

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Odstraňování nástřiků pulzujícím vysokorychlostním vodním
paprskem**

**Removal of Sprayed Coatings by Pulsating High-Speed Water
Jet**

Student:

Bc. Lukáš Blaha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Ostrava 2015



VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Blaha**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Specializace: **20 Strojírenská technologie**
Téma: **Odstraňování nástřiků pulzujícím vysokorychlostním vodním paprskem**
Removal of Sprayed Coatings by Pulsating High-Speed Water Jet

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Rozdíl mezi klasickým kontinuálním vodním paprskem a pulzujícím vodním paprskem.
4. Aplikace nástřiků na kovové materiály – materiály, důvody, využití, způsoby povlakování.
5. Experimentální zkoušky odstraňování různých nástřiků pulzujícím a kontinuálním vodním paprskem.
6. Analýza a interpretace zjištěných poznatků, závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovém obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [3] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London : E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [4] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.
- [5] Série sborníků *International Conference on Water Jetting*, BHR Group.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Šítek, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2015.....

.....
podpis studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́domи, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́domи, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2015


podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Lukáš Blaha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hornická 1058 Dubňany 696 03



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BLAHA, L. *Odstraňování nástřiků pulzujícím vodním paprskem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 69 s. Vedoucí práce: Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá technologií vodních paprsků a odstraňováním žárových nástřiků vodními paprsky. Práce obsahuje teoretickou část, která se zaměřuje na vodní paprsky a jejich rozdělení podle různých kritérií. Jsou uvedeny principy řezání, činitelé, které ovlivňují vlastnosti paprsků, výhody a nevýhody či již samotné využití vodních paprsků. Další část práce je zaměřena na popis pulzujícího vodního paprsku, rozdíl mezi pulzujícím a kontinuálním vodním paprskem, výhody a využití pulzujících paprsků v praxi. Následuje kapitola, která se zabývá žárovými nástřiky. Podstatnou část pak zaujímá experiment odstraňování žárových nástřiků pulzujícím a kontinuálním vodním paprskem a jeho vyhodnocení. Na konci diplomové práce je provedeno zhodnocení a interpretace získaných poznatků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BLAHA, L. *Removal of Sprayed Coatings by Pulsating High-Speed Water Jet*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining, assembly and engineering metrology, 2015, 69 p. Thesis head: Ing. Libor Sitek, Ph.D.

The presented master's thesis focuses on the technology of water jets and removal of thermal spray coatings with water jets. The thesis consists of a theoretical part which deals with water jets and their classification according to different criteria. The principles of cutting, factors affecting the properties of water jets, applications of water jets and their advantages and disadvantages are also presented. The next part of the thesis aims at describing the pulsating water jets, the difference between continuous and pulsating water jets, advantages and application of the pulsating jet for practice. The following chapters deal with the thermal spraying. Significant part of the thesis focuses on the experiment of the removal of thermal spray coatings with pulsating and continuous water jets and evaluation of experimental results. At the end of the thesis, the obtained knowledge is evaluated and analysed.

**Obsah:**

Seznam použitých značek a symbolů:	8
Úvod:	9
1. Nekonvenční technologie obrábění:	10
1.1 Elektroerozivní technologie obrábění:	11
1.2 Elektrochemické technologie obrábění:	11
1.3 Chemické technologie obrábění:	12
1.4 Technologie obrábění laserem:	13
1.5 Technologie obrábění plasmou:	13
1.6 Technologie obrábění ultrazvukem:	14
1.7 Technologie obrábění vodním paprskem:	14
2. Základy technologie vysokorychlostních vodních paprsků:	15
2.1 Historie využití vodní energie:	15
2.2 Historie využití vodních paprsků:	16
2.3 Dělení vodních paprsků:	18
2.4 Princip obrábění vodním paprskem:	19
2.5 Řezání čistým vodním paprskem (WJM):	21
2.6 Řezání materiálu vodním paprskem s abrazivní příměsí (AWJ):	23
2.6.1 Abrazivo:	24
2.7 Zařízení pro řezání vodním paprskem:	25
2.8 Další technologické možnosti využití vodního paprsku:	29
2.8.1 Soustružení vodním paprskem:	29
2.8.2 Frézování vodním paprskem:	29
2.8.3 Gravírování vodním paprskem:	29
2.8.4 Otryskávání vodním paprskem:	30
2.8.5 Vrtání vodním paprskem:	30
2.9 Výhody a nevýhody obrábění vodním paprskem:	31



2.10 Využití vodních paprsků:	33
2.11 Bezpečnost práce s vodním paprskem:	34
3. Pulsující vodní paprsek:	35
3.1 Technologie vysokorychlostního pulzujícího paprsku:	35
3.2 Dopad kapaliny na pevný povrch:	36
3.3 Rozdíl mezi pulzujícím a normálním kontinuálním paprskem:	37
3.4 Generování pulzujícího paprsku:	38
3.5 Účinky pulzujících vodních paprsků na materiály:	39
3.6 Výhody pulzujících vodních paprsků:	39
3.7 Využití pulzujících vodních paprsků:	39
4. Nástřiky na kovové materiály:	40
4.1 Princip žárových nástřiků:	40
4.2 Rozdělení metod žárového stříkání:	41
4.3 Způsoby aplikace žárového nástřiku kovů:	42
4.4 Struktura žárového nástřiku:	43
4.5 Vlastnosti žárového nástřiku:	44
4.6 Využití žárových nástřiků:	45
5. Experimentální zkoušky odstraňování žárových nástřiků	46
5.1 Popis použitého zařízení na odstraňování žárových nástřiků:	46
5.2 Způsob zobrazení struktury žárových nástřiků pomocí CT tomografie:	47
5.3 Popis experimentu odstraňování žárových nástřiků:	49
5.4 Výsledky experimentálních zkoušek:	51
6. Analýza a interpretace zjištěných poznatků:	58
Závěr:	64
Seznam použité literatury:	66



Seznam použitých značek a symbolů:

ECM	Elektro chemical machining
UHP	Ultrahigh-pressure
WJ	Water jet
AWJ	Abrasive water jet
CT	Computed Tomography



Úvod:

Člověk může účinky vody pozorovat všude kolem sebe. Samotná síla vody je známá odedávna. Její ohromná energie může být i nebezpečná a škodlivá. Při různých živelných katastrofách dokáže brát domovy i životy.

Ohromná síla vody však může být i prospěšná, pokud se využije účelně. V dnešní době se voda hojně užívá téměř ve všech odvětvích průmyslu. Uplatnění nachází především v zemědělství, potravinářství, lékařství, stavitelství, v hornictví, v energetice a samozřejmě i ve strojírenství. Zde je voda nejčastěji využívána pro chlazení a oplachování.

Další uplatnění vody bylo nalezeno díky faktu, že po přivedení vody pod tlakem do úzké trysky vznikne obrovská výstupní kinetická energie vodního paprsku. Té se začalo využívat pro čištění a zejména pro řezání. Kombinací technologie vodního paprsku s vhodnými řeznými podmínkami dostáváme velmi účinný nástroj, který se při používání nikdy neotupí.

Řezání vodním paprskem se v poslední době využívá čím dál častěji, což má hned několik důvodů. Jednou z nejvýznamnějších předností je možnost dělit téměř každý materiál nejrůznějších tloušťek. Touto technologií je možno dělit jak materiály velmi tvrdé a houževnaté (ocel, hliník, dural, nerostné materiály, plast), tak i materiály měkké, jako je pryž, guma apod. Další významnou předností tohoto dělení (řezání) je to, že obrobek není nijak tepelně ovlivněn a je dosahováno relativně vysokých přesností. Díky moderním zařízením dnes často odpadá nutnost dalšího opracování.



1. Nekonenční technologie obrábění:

Obrábění vodním paprskem patří mezi nekonvenční metody obrábění. U těchto metod se nepoužívá standardní řezný nástroj, ale k úběru materiálu dochází účinky tepelnými, chemickými nebo abrazivními, případně jejich kombinací. Nekonenční technologie obrábění používáme tam, kde by klasický způsob obrábění byl obtížný nebo nemožný. Můžeme obrábět součásti s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí a tvarově velmi složité díly. [1] [2]

Nekonenční technologie obrábění dělíme podle fyzikální podstaty na:

a) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

- Obrábění ultrazvukem
- Obrábění vodním paprskem

b) Oddělování materiálu tepelným účinkem:

- Elektroerozivní obrábění
- Obrábění paprsky koncentrované energie:
 - Obrábění paprskem laseru
 - Obrábění elektronovým paprskem
 - Obrábění iontovým paprskem
 - Obrábění paprskem plazmy

c) Oddělování materiálu elektrochemickým účinkem

- Elektrochemické obrábění

d) Oddělování materiálu chemickým účinkem [1] [3]

- Chemické obrábění

V další části mé diplomové práce stručně přiblížím některé nekonvenční technologie obrábění.



1.1 Elektroerozivní technologie obrábění:

Zahrnuje řadu metod, jejímž charakteristickým znakem je, že úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými výboji mezi nástrojem a obrobkem. Z obráběného materiálu jsou tavením a odpařováním oddělovány velmi malé částice, které jsou odplavovány dielektrickou kapalinou. Jedná se tedy o elektrickou erozi, což je jev založený na odebrání částic povrchových vrstev materiálů účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. [1] [2]

Elektroerozivní technologie obrábění jsou:

- Elektrojiskrové hloubení
- Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou
- Elektrojiskrové děrování
- Elektrojiskrové leštění
- Elektrojiskrová tvorba textu
- Elektroimpulzní obrábění
- Elektrokontaktní obrábění

1.2 Elektrochemické technologie obrábění:

Je to řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu, který proudí mezerou mezi elektrodami. Vyrábí se takto tvarově složité součásti (zápustky, lisovací formy apod.). Nástroj má tvar negativu vyráběné součásti. [1] [3]

Elektrochemické technologie obrábění jsou:

- ECM (elektro chemical machining) hloubení tvarů a dutin
- ECM hloubení otvorů malých průměrů
- Elektrochemické soustružení
- Elektrochemické odstraňování otřepů
- Elektrochemické dělení materiálu



- Rotujícím kotoučem
 - Drátovou elektrodou
 - Štěrbínovým nástrojem
- Elektrochemické broušení
 - S vodivým brousícím kotoučem
 - S nevodivým brousícím kotoučem
 - Metoda volného brusiva
- Elektrochemické leštění
- Elektrochemické honování
- Elektrochemické lapování
- Elektrochemické značení
- Kombinované metody elektrochemického obrábění
 - Anodomechanické obrábění

1.3 Chemické technologie obrábění:

Podstatou je řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce od několika setin mm do několika mm z povrchu obrobku. Je založeno na chemické reakci obráběného povrchu s pracovním prostředím. Místa, která nemají být obrobena, jsou chráněna speciálním povlakem - maskou. [1][2]

Chemické technologie obrábění jsou:

- Leptání:
 - Chemické rozměrové leptání
 - Chemické prostřihování
- Anizotropní a selektivní leptání
- Termické odstraňování otřepů



1.4 Technologie obrábění laserem:

Při obrábění dochází k úběru materiálu účinkem paprsku silného monochromatického světla na velmi malou plochu. Působením laserového paprsku dochází k místnímu ohřevu na velmi vysokou teplotu až 10 000°C, která způsobí roztavení obráběného materiálu. Mohou se obrábět různé materiály od dřeva přes plasty až po těžkoobrobitelné materiály. Výhodou je vysoká přesnost a úzké řezy. [1] [2]

Technologie obrábění laserem jsou:

- Značení a popisování
- Řezání
- Vrtání
- Mikroobrábění
- Soustružení
- Frézování
- Odjehlování obrobených součástí
- Lámání dlouhých třísek při mechanickém obrábění
- Dokončování povrchů – nanášení speciálních vrstev

1.5 Technologie obrábění plasmou:

Při tomto způsobu obrábění je materiál odtavován, odpařován a rozprašován paprskem plasmy, která vystupuje z hořáku vysokou rychlostí. Plasma je vodivý stav plynu, který obsahuje směs volných elektronů a má vysokou teplotu – až 30 000°C. Proces obrábění je tak intenzivní, že se částice obráběného materiálu odtavují velmi rychle a tepelně ovlivněná vrstva nepřesáhne 1 mm. Vzhledem k velké rychlosti odpovídá přesnost hrubovacím operacím. [1] [2] [3]

Technologie obrábění plazmou jsou:

- Řezání paprskem plasmy
- Soustružení, frézování, a hoblování s využitím paprsků plasmy



1.6 Technologie obrábění ultrazvukem:

Je to způsob používaný pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů a materiálů elektricky nevodivých. Úběr materiálů vzniká abrazivním účinkem abraziva, které se přivádí ve formě suspenze mezi ultrazvukem rozkmitaný nástroj a obráběný materiál. Tlakem kmitajícího nástroje jsou zrna brusiva vtlačována do materiálu, kde odebírají jeho drobné částice. Druh brusiva volíme dle druhu obrobku. Pro měkčí materiály karbid křemíku, pro tvrdší karbid boru. Nevýhodou je, že abrazivní účinek zrn působí nejen na obrobek, ale i na nástroj. [1] [3]

Technologie obrábění ultrazvukem jsou:

- Řezání
- Hloubení průchozích děr, vrtání diamantovými nástroji
- Broušení rovinných ploch, čištění brusného kotouče
- Soustružení, honování a superfinišování
- Zpevnění povrchu

1.7 Technologie obrábění vodním paprskem:

Využívá k oddělování materiálu kinetickou energii vysokorychlostního vodního paprsku, případně kombinovanou s kinetickou energií abrazivních částic. K úběru materiálu dochází erozivním procesem v důsledku působení řezného média (částic), usměrněného do úzkého paprsku, který prochází přes trysku do obrobku. [1] [3]

Vzhledem k zaměření mé diplomové práce se technologii vysokorychlostního vodního paprsku věnuji blíže v následující kapitole.

2. Základy technologie vysokorychlostních vodních paprsků:

2.1 Historie využití vodní energie:

Voda je v dnešní době využívána velmi intenzivně. Už dávno neslouží jen jako pitný zdroj, ale také jako prostředek na mytí, zavlažování, nachází uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích a v neposlední řadě se využívá k výrobě elektrické energie, která je nedílnou součástí dnešního života.

Vodní energie je ze všech obnovitelných zdrojů ve světě i v ČR využívána nejvíce. Historie využití vodní energie sahá až do starověku, kde se jí nejprve využívalo v dopravě, později pak pro chod mechanismů, jako jsou mlýny, hamry a čerpadla (Obr. 2.1). V roce 210 př. n. l. Filón z Byzancie popsal sirénu poháněnou vodním kolem s vrchním přívodem vody. Byla to jedna z věcí, které přispěly k rozšíření využití kinetické energie vody. [4]



Obr. 2.1 Vodní mlýn

2.2 Historie využití vodních paprsků:

Řezání vodním paprskem má své kořeny již v daleké minulosti. Člověk pozoroval působení vody na okolní prostředí odpradáva a zjistil, že voda stékající po svahu eroduje reliéf krajiny a tím modeluje údolí, jako příklad lze uvést Grand Canyon řeky Colorado – 350 km dlouhý, 6-30 km široký, 1800 m hluboký (obr. 2.2). Pokud jde o cílené využití vody člověkem, egyptské desky v Britském muzeu zmiňují možnost využití vody k oddělení zlata od hlušiny, zhruba 4000 let př. n. l. [5]



Obr. 2.2 Grand Canyon řeky Colorado

V 19. století proběhlo zdokonalení čerpací techniky a došlo k výraznému rozvoji využití energie vodních paprsků člověkem. Byla vyvinuta kompaktní čerpací zařízení, vhodná pro použití v dolech a v odlehlých oblastech. Dvacátá léta devatenáctého století jsou označována za začátek používání vodních trysek k odstranění písku a horniny v denní stavební činnosti. Tyto trysky dosahovaly velkých rychlostí toku s tlakovou úrovní několika desítek až stovek barů. Kolem roku 1870 kalifornští zlatokopové použili metodu vodního paprsku k odstranění nánosů písku a vrstev kamení. Jednalo se však pouze o nízkotlaké systémy.

Od roku 1915 se vodní paprsek začal používat k hydrodobývání uhlí. V roce 1936 byl vodní paprsek použit k řezání děr v uhelných slojích. Mezi lety 1950 až 1960 vznikla potřeba těžít uran, vodní paprsek eliminoval rizika přidružená k těžbě jako je např.

nebezpečné záření. Tím se oživil zájem o použití vody jako řezného nástroje s tryskami o vysokém tlaku. V padesátých letech dvacátého století experimentoval inženýr lesního hospodářství Dr. Norman Franz s formami řezání vodním paprskem. Byl první osobou, která studovala použití velmi vysokého tlaku (UHP – ultrahigh-pressure) vody jako řezného nástroje. Dr. Norman Franz (obr. 2.3) je považován za otce vodního paprsku. Začátkem šedesátých let minulého století dokázal získat krátkodobé expanze vysokého tlaku, který byl mnohonásobně vyšší než do té doby užívané pracovní hodnoty tlaků. Pozdější studium věnoval kontinuálnímu proudu vody. První komerční aplikace přišla na svět v roce 1971.



Obr. 2.3 Dr. Norman Franz

Rozvoj řezání vodním paprskem propukl v polovině dvacátého století, ale doznal širokého uplatnění až v osmdesátých letech, kdy se do paprsku vody začala přidávat abraziva. Už v roce 1975 společnost Flow uvádí na trh čerpadla s intenzifikátorem pro nepřetržitý provoz. Poprvé je tato technologie komerčně využita k řezání jednorázových dětských plen. V roce 1979 Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidání abraziva k vodnímu paprsku. Tím se umožnilo řezání materiálů s vyšší pevností, tvrdostí a s větší tloušťkou. V roce 1980 byly systémy řezání abrazivním vodním paprskem poprvé použity k řezání oceli, skla a betonu. V roce 1983 společnost Flow prodává jako první na světě komerční systém řezání automobilového skla abrazivním vodním paprskem. V roce 1986 pak tatáž společnost vynalézá první ultra-vysokotlaké čerpadlo s přímým pohonem a tlakem 2400 barů. Mobilní ultra-vysokotlaký systém řezání vodním paprskem je představen jako první na světě pro mobilní a terénní aplikace, jako jsou průmyslové čištění, údržba komunikací a projekty modernizace infrastruktury. V roce 1992 společnost Flow představuje jako první na světě trojčinné čerpadlo s tlakem 2700 barů. V roce 1995 se pak



stává prvním světovým dodavatelem systémů řezání vodním paprskem od jednoho výrobce a představuje jako první na světě plunžrové čerpadlo se třemi písty (plunžry) a tlakem 3400 barů. V roce 2001 společnost uvádí na trh technologii Dynamic Waterjet, která odstraňuje úkosy a zvyšuje přesnost. Podobnou technologii „naklápění“ trysky při řezání pak zavedli do výroby i další výrobci vysokotlakých řezacích zařízení. V roce 2010 byl představen software FlowXpert pro 3D programování řezacích strojů. [6] [7]

2.3 Dělení vodních paprsků:

Vodní paprsky můžeme rozdělit podle následujících kritérií:

a) Podle typu řezné kapaliny:

- Vodní
- Olejový
- Lihový
- Rtuťový
- Zkapalněný plyn
- Jiný

b) Podle pracovního tlaku:

- Nízkotlaký
- Středotlaký
- Vysokotlaký
- Ultravysokotlaký

c) Podle použité příměsi:

- Bez příměsi
- S příměsí polymerů
- S jinými příměsmi

d) Podle abraziva:

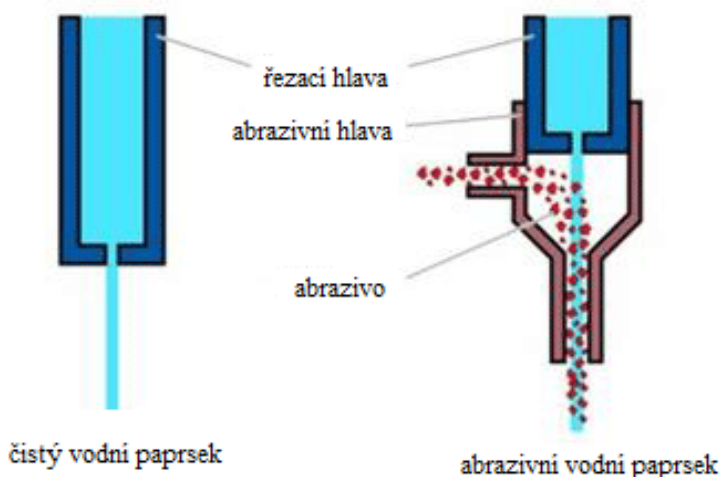
- Bez abraziva
- S přísávaním abraziva
- Se suspenzí abraziva [1] [6]

2.4 Princip obrábění vodním paprskem:

Podstata obrábění vodním paprskem spočívá v odebírání materiálu mechanickým účinkem při dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií. Do vodního paprsku se může přidávat abrazivo, které pak znásobuje mechanický účinek vodního paprsku.[6]

Uvedená metoda se dnes využívá nejčastěji ve dvou provedeních (obr. 2.4):

- Řezání čistým vodním paprskem WJ (Water Jet)
- Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí AWJ (Abrasive Waterjet) [7]



Obr. 2.4 Schéma metody řezání čistým a abrazivním vodním paprskem

Pomocí vysokotlakého čerpadla (multiplikátoru či triplexového plunžru) je voda přiváděná ze zdroje či zásobníku přes filtr a je stlačována na vysoký tlak. Takto stlačená voda proudí vysokotlakým potrubím skrz akumulátor rázů a vysokotlaký filtr do řezací hlavy. Voda v řezací hlavě prochází primární vodní tryskou, ve které se vytváří vodní paprsek o průměru 0,2 až 0,4 mm. Tato tryska je vyměnitelná, takže její průměr lze zvolit dle požadavků. Tento typ paprsku už může sloužit jako řezný nástroj pro řezání měkkých materiálů, na čištění apod. Pokud užíváme abrazivní vodní paprsek, proud vody dále prochází přes směšovací komoru, do které je abrazivo přiváděno přes dávkovač ze zásobníku. Abrazivo je nasáváno do směšovací komory podtlakem, který je v komoře

vytvářen rychle se pohybujícím vodním paprskem. Jako abrazivo se nejčastěji používá granát.

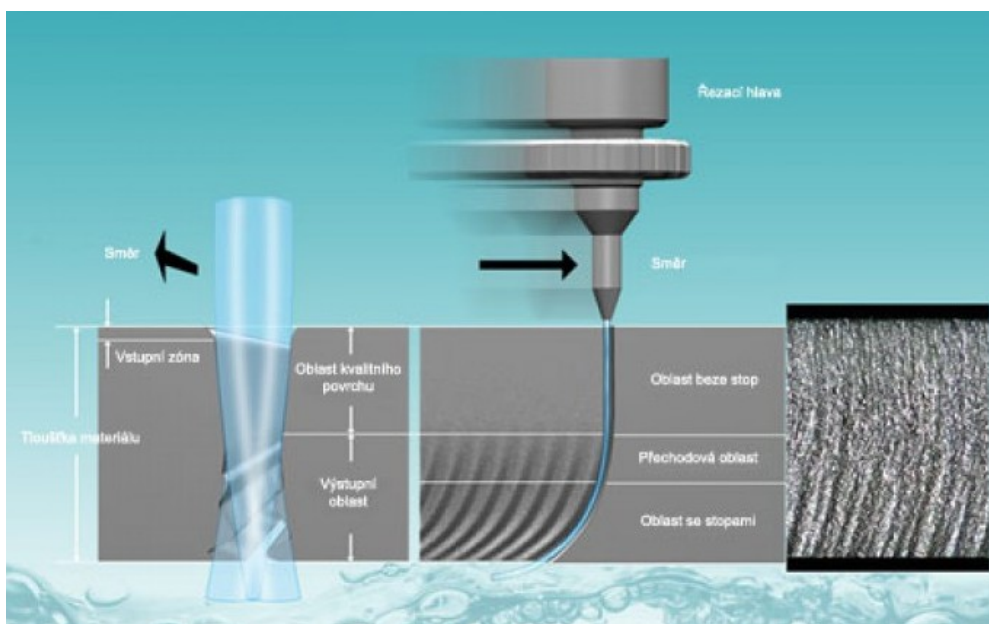
Paprsek vody, obohacený o abrazivní materiál přichází do zaostřovací trubice, kde vzniká „abrazivní řezací nástroj“, který již obrábí téměř všechny známé materiály. V tomto případě se jedná o metodu abrazivního vodního paprsku (AWJ). Pokud se jedná o čistý vodní paprsek, tedy metodu (WJ) z celého systému odpadá směšovací komora a zaostřovací trubice.

Vodní paprsek procházející obrobkem se zachycuje v lapači (vaně), umístěné pod řezaným materiálem. Usazené abrazivo lze odčerpát pomocí čerpadel a odseparovat v odkalovacím zařízení.

Vlastní proces řezání probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením energie kapaliny prohlubeň, která se postupně mění v průchozí otvor. V druhé etapě se pak vytvářejí řezné spáry. [7] [8] [9] [10]

Řezná dráha paprsku

Během procesu řezání proniká vodní paprsek do obráběného materiálu, kde postupně ztrácí svoji kinetickou energii a následně se vychyluje z původního směru. Vychýlení vodního paprsku se postupně zvětšuje s rostoucí vzdáleností od místa vniku paprsku a tím se také zhoršuje jakost povrchu obrobene plochy (obr. 2.5). [7]



Obr. 2.5 Vnikání vodního paprsku do materiálu obrobku



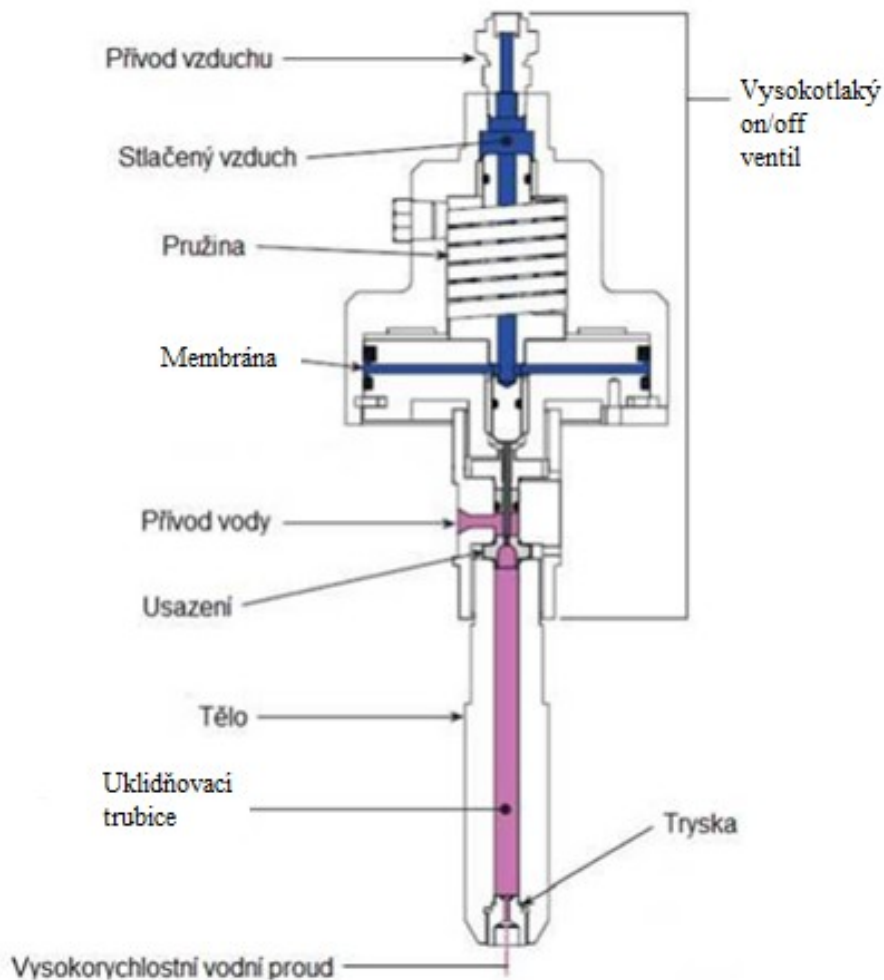
Parametry ovlivňující řezný proces vodním paprskem:

Parametry, které ovlivňují proces úběru materiálu, mají vliv na kvalitu i cenu řezu a je jich hned několik:

- Charakteristiky materiálu (tvrdost, pevnost, struktura atd.)
- Výtokový průměr trysky
- Průměr a délka zaostřovací trubice (v případě abrazivního vodního paprsku)
- Tlak vody
- Rychlostí posuvu (pohybu) paprsku
- Úhel sklonu paprsku
- Přítomností aditiv ve vodě
- Druh, zrnitost a množství abraziva (v případě abrazivního vodního paprsku)
- Vzdálenost ústí trysky od obrobku [1] [6]

2.5 Řezání čistým vodním paprskem (WJ):

U řezání čistým vodním paprskem je materiál porušován proudem vody nadzvukovou rychlostí bez přídavných materiálů. Řezání čistým vodním paprskem patří k původnímu způsobu dělení materiálů. První komerční využití proběhlo v první polovině 70. let minulého století a jednalo se o řezání vlnitého kartonu. Paprsek vody má vysokou kinetickou energii, která odtrhává částčky materiálu z obrobku. Schéma hlavičky pro řezání WJ ukazuje obr. 2.6. [6]



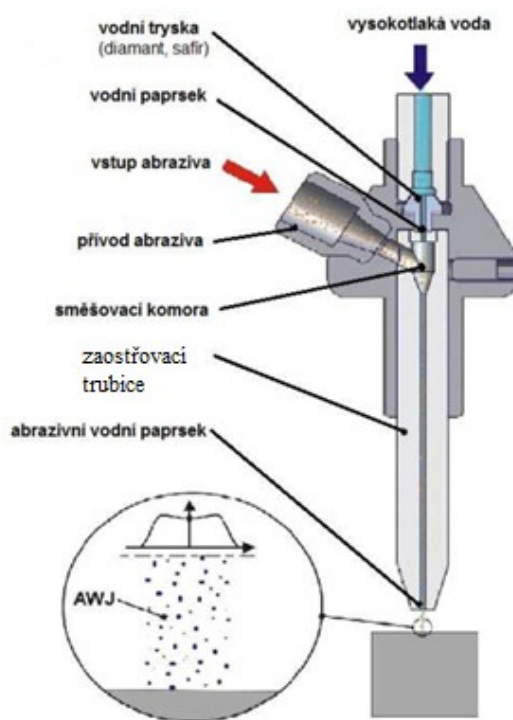
Obr. 2.6 Hlavice pro řezání WJ [10]

Použití metody řezání čistým vodním paprskem je však omezené, protože nemůže řezat tvrdé materiály. Zařízení pro obrábění vodním paprskem se dnes používá zejména pro řezání nekovových materiálů, jako jsou lamináty, kevlar, azbestocement, grafitové kompozity, sklotextil, gumotextil, a k řezání tenkých kovových plechů. [7] [11]

2.6 Řezání materiálů vodním paprskem s abrazivní příměsí (AWJ):

Při této metodě se zvyšuje účinnost paprsku přimísením abrazivních zrn do proudu vody. Používají se nejen syntetické, ale i přírodní abrazivní materiály jako jsou granát, olivín, korundová nebo SiC zrna používaná k výrobě brusných nástrojů a jiné.

Abrazivní paprsek se od čistého vodního paprsku odlišuje. U abrazivního vodního paprsku slouží vodní paprsek k urychlování abrazivních částic, které pak rozrušují materiál. Erozivní účinek je díky přidanému abrazivu mnohonásobně větší než erozivní síla čistého vodního paprsku. Proto je tato technologie používána pro řezání tvrdých materiálů, jako jsou kovy, kámen, keramika, kompozity apod. Může tedy v řadě případů úspěšně nahradit poměrně složité a zdoluhavé obrábění mechanickými nástroji. Schéma hlavice pro obrábění abrazivním vodním paprskem uvádí obr. 2.7 [6] [12]



Obr. 2.7 Řez hlavicí pro AWJ[12]

Zaostřovací trubice musí odolávat vysokým abrazivním účinkům a je vyráběna z karbidu wolframu, keramických materiálů na bázi korundu nebo z kubického nitridu bóru. Při použití běžných parametrů, tj. tlaku vody 400 MPa a granátu o zrnitosti 0,3 mm, dosahuje životnost trysky max. 100 hodin.

Rychlost řezání se obvykle stanovuje optimalizační zkouškou. Vzdálenost výstupní trysky od materiálu se volí co nejmenší z důvodů minimální šířky spáry a tím i dosahované přesnosti. [7] [13][14]

2.6.1 Abrazivo:

Abrazivo se do vodního paprsku přivádí v tzv. směšovací komoře a díky němu se dosahuje mnohonásobně vyššího výkonu vodního paprsku. Nejdůležitějšími požadavky na abrazivní materiály jsou maximální řezný výkon, minimální opotřebení zaostřovací trubice a minimální negativní dopad na pracovní a životní prostředí.

Abrazivní materiály mohou být jak přírodní, tak i uměle vyrobené. V současné době se jako abrazivo nejvíce využívá granát (obr. 2.8), který při řezání dosahuje vysoké produktivity. Dalšími možnými druhy abraziva jsou například korund, diamant a olivín. Dříve se často užíval křemičitý písek, který má ale nepříznivé účinky na pracovní podmínky a zdraví obsluhy.

Na druhu použitého abraziva závisí především životnost použitých trysek. Pro velikost abraziva platí, že čím větší je zrno abraziva, tím je větší úběr materiálu a naopak. Velmi jemná zrnitost je vhodná pro dokončování součástí případně pro aplikace mikrořezání AWJ a větší zrnitost abraziva pak pro hrubovací operace. Zrnitost tedy znatelně ovlivňuje jakost povrchu obrobené plochy. [1] [6] [7]

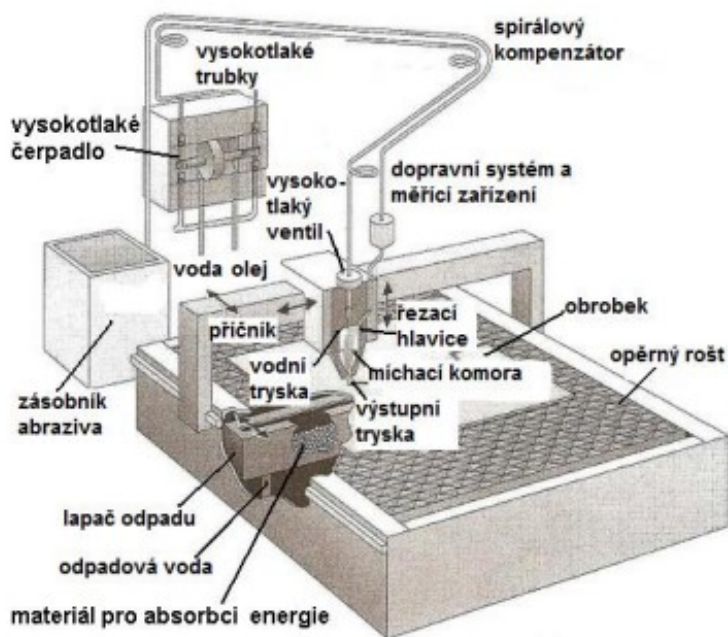


Obr. 2.8 Granát

2.7 Zařízení pro řezání vodním paprskem:

Zařízení se skládá ze dvou okruhů, primárního (nizkotlaký) a ze sekundárního (vysokotlaký). Vysokotlaký okruh je řízen nizkotlakým okruhem, a to prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvozeného hydraulickou jednotkou. Zařízení pro řezání vodním paprskem (obr. 2.9) je obvykle složeno z: [2]

- Vysokotlakého čerpadla
- Akumulátoru
- Vysokotlakého potrubí
- Filtrů
- Systému pro dávkování abraziva
- Řezací hlavice
- Trysek
- Zařízení pro pohyb řezací hlavice
- Opěrného roštu
- Lapače odpadu
- Systému úpravy vody
- Systému recyklace vody [2] [6]



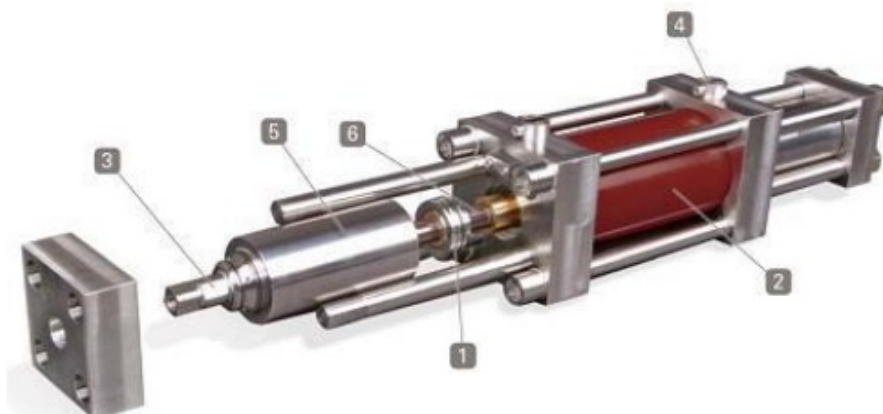
Obr. 2.9 Zařízení pro řezání vodním paprskem

Zdroj vysokotlaké kapaliny:

Pro generování vysokorychlostního vodního paprsku se využívají dva druhy čerpadel, které vytvářejí vysoký tlak: zařízení s multiplikátorem (násobičem) nebo zařízení s triplexovým plunžrem. [6]

a) Zařízení s multiplikátorem:

Využívá hydraulického řízení k posouvání pístu. Díky rovnosti sil je nízký tlak hydraulického oleje na velkém pístu znásoben na velký tlak vody na malém pístu. Při změně směru pohybu pístu však dochází na výstupu z multiplikátoru k pulzaci kapaliny, a proto se v obvodu používá akumulátor tlakových razů. Ten udržuje přibližně konstantní hodnotu tlaku kapaliny, která pak vstupuje do dýzy (obr. 2.10) [6] [9].



1 – Hydraulické těsnění s ložiskem, 2 – Nízkotlaký válec, 3 – Zpětný ventil, 4 – Elektronika, 5 – Vysokotlaký válec, 6 – Píst

Obr. 2.10 Multiplikátor

b) Zařízení s triplexovým plunžrem:

Je charakteristické přímým řízením mechanismu, který má jednoduchou konstrukci klikového zařízení. Tlak je generován paralelně zařazenými válci s jednočinnou pístnicí. Díky snížení pulzací tlaku se zvyšuje účinnost zařízení a není potřebný akumulátor. Výhodou tohoto zařízení je jeho rozměrová nenáročnost. [9]

Akumulátor tlakových rázů:

Je zařízení používané pro tlumení rázů vody v multiplikátoru. Akumulátor, je dutá tlaková nádoba o daném objemu, ve kterém je voda stlačena na požadovaný tlak. Využívá se stlačitelnosti kapaliny při vysokých tlacích (cca 12% při tlaku 430 MPa). Po dosažení vyrovnaného tlaku se voda dostává z akumulátoru do vysokotlakého potrubí. Úkolem akumulátoru je udržovat stejnou rychlost a stejný tlak vysokotlakého proudu v systému. [6]

Vysokotlaké potrubí:

Vysokotlaké potrubí je sestaveno z různých druhů armatur a spojovacích elementů. Potrubí na rozvod vysokotlaké vody je vyrobeno z korozi-vzdorné oceli o průměru $6 \div 14$ mm. Všechny komponenty na rozvod vody se vyrábí normalizované a standardizované.

Řezací hlava:

Řezací hlava závisí na použitém druhu vodního paprsku. Pro čistý vodní paprsek je ve spodní části těla řezací hlavy umístěna vodní tryska, kde vzniká vodní paprsek. U abrazivního vodního paprsku, po průchodu vodní tryskou, umístěné v horní části řezací hlavy, paprsek dále postupuje do směšovací komory, do které jsou ze zásobníku nasávána abrazivní zrna. Paprsek se abrazivními zrny obohatí a prochází přes zaostřovací trubici do místa řezu (obr. 2.11). [6] [9]



Obr. 2.11 Řezací hlava

Trysky:

Trysky jsou důležitou součástí zařízení na obrábění vodním paprskem. Ovlivňují kvalitu vodního paprsku a tím i kvalitu řezu. Při řezání vodním paprskem se používají dva druhy trysek:

- tryska na řezání čistou vodou,
- tryska na řezání abrazivním vodním paprskem (zaostřovací trubice)

Zásobník abraziva:

Slouží k úschově abraziva. Ze zásobníku se zrna abraziva nasávají do směšovací komory řezací hlavy (obr. 2.12).



Obr. 2.12 Zásobník abraziva a regulátor toku abraziva

Lapač zbytkové energie paprsku:

Toto zařízení zachytává vodní či abrazivní paprsek, který projde přes řezaný materiál. Slouží nejen k případnému zachytávání použitého abraziva, ale také třísek z obrobku a tlumení hluku, kdy při řezání AWJ paprskem hodnota hluku dosahuje až 105 dB. Jako lapač zbytkové energie paprsku se používá nádoba naplněná vodou, která musí být dostatečně hluboká, aby došlo k lámání vodního paprsku dříve, než paprsek dosáhne dna nádoby. Nádoba by měla být vysoká 300 ÷ 600 mm a v případě nedostatku prostoru může být použita nižší nádoba naplněná kovovými kuličkami. [6] [9]



2.8 Další technologické možnosti využití vodního paprsku:

2.8.1 Soustružení vodním paprskem:

Kromě řezání materiálů má abrazivní vodní paprsek své opodstatnění i v oblasti soustružení. Při soustružení paprskem obrobek rotuje a nástroj v podobě paprsku se posouvá podél osy obrobku. Soustružení paprskem se používá zejména pro tvrdé, těžko obrobitelné materiály jako jsou například vysokopevnostní slitiny, keramiky, kompozity, kameny atd. Radiální posuv zajišťuje požadovanou hloubku řezu. [15]

2.8.2 Frézování vodním paprskem:

Frézování abrazivním vodním paprskem se používá pro tvarově složité obrobky. U frézování pomocí AWJ nedochází k prořezání obrobku v celé jeho tloušťce, hloubka řezu je menší než celková tloušťka materiálu. Jde o proces, při kterém vodní paprsek opakovaně přechází po obrobené ploše obrobku a postupně vytváří tvar blížící se konečné podobě dané součásti.

Frézování abrazivním vodním paprskem se nečastěji používá k obrábění skla a minerálů, ale také pro tvarově složité obrobky z kovových i nekovových materiálů. [15]

2.8.3 Gravírování vodním paprskem:

Technologie gravírování AWJ paprskem je velmi podobná technice frézování AWJ paprskem. Snahou je odstranit materiál pouze z povrchových vrstev do určité hloubky. Silou vodního paprsku je do materiálu vytvářen výsledný profil, nebo je následně ještě opracován umělcem do požadovaného finálního designu. Technika gravírování AWJ paprskem je velice univerzální a progresivní díky schopnosti odebírat takřka jakýkoliv materiál. Omezení minimálního zaoblení rohů je dáno průměrem paprsku. Pro měkké a tenčí materiály se používá paprsek o průměru 0,2 mm bez přidaného abraziva. Pro tvrdé a silnější materiály se volí paprsek o průměru 0,5 – 2,5 s přídavkem abraziva. [15] [16]

2.8.4 Otryskávání vodním paprskem:

Otryskávání vysokorychlostním vodním paprskem patří k nejefektivnějším metodám čištění v mnoha odvětvích průmyslu (obr. 2.13). Nejčastěji se používá ve stavebnictví k otryskání betonů. Vodní paprsek dokáže odstranit vrstvy starého betonu do hloubky až 35 cm (v závislosti na kvalitě dané vrstvy). Vysoký vodní tlak je vhodný také k odstranění koroze z kovových konstrukcí. [15]



Obr. 2.13 Otryskávání vodním paprskem

2.8.5 Vrtání vodním paprskem:

Metoda vrtání otvorů pomocí technologie AWJ je charakterizována vzájemným pohybem paprsku a obrobku. Nejčastěji se využívá vrtání se stacionárním paprskem i obrobkem, nebo vrtání rotujícím či vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem, tzv. vyřezávání středu otvoru. [15]

2.9 Výhody a nevýhody obrábění vodním paprskem:

Výhody obrábění vodním paprskem:

- Vysoká energetická účinnost až 80 %
- Studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplo
- Obrobené hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci
- V obrobené ploše nejsou zbytková napětí ani mikrotrhliny
- Proces obrábění je téměř bezprašný
- Malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu
- Řezání bez omezení směru, obrysu, tvaru nebo úkosu (obr. 2.14)
- Mimořádná spolehlivost a jednoduchost obsluhy
- Změnou tlaku lze v krátkých časových úsecích oplachovat, otryskávat, čistit nebo řezat.
- Vysoká flexibilita i při složité geometrii výřezu
- Přesné čištění a leštění povrchu těžkoobrobitelných materiálů (např. keramiky)
- Šetrnost k životnímu prostředí
- CNC řízení
- Univerzálnost – dělí všechny materiály. Lze řezat i velmi obtížně dělitelné a jinak neobrobitelné materiály
- Možnost řezání pod hladinou [1] [17] [18] [19]

Nevýhody obrábění vodním paprskem:

- Zaoblení vnitřních rohů je dáno průměrem paprsku
- Řezaný materiál musí snášet přímý kontakt s vodou, voda ho nesmí znehodnotit
- Relativně vysoká pořizovací cena zařízení
- Náchylnost některých materiálů ke korozi
- Hlučný a mokrý provoz
- Nižší rychlost řezání u těžkoobrobitelných materiálů
- Vysoké požadavky na kvalitu a čistotu vody [1] [6] [20]



Obr. 2.14 Řezání tlakové láhve



2.10 Využití vodních paprsků:

Dříve byla technologie řezání vodním paprskem přiřazována spíše k leteckému a kosmickému průmyslu. V dnešní době se řezání vodním paprskem využívá v mnoha jiných odvětvích.

- Strojírenský průmysl – řezání titanu, wolframu, tantalu, uranu, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co), kompozitů, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástí (lopatky a díly proudových a raketových motorů, turbín a kompresorů), řezání vláknitých materiálů
- Stavební průmysl – dělení plastů (polyuretany, polystyrény, atd.), čedičové vaty azbestu, betonu, keramiky
- Elektrotechnický a elektronický průmysl – řezání feritů, keramiky, skla, amorfních látek, permanentních magnetů, desek tištěných spojů
- Gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů, vláken
- Papírenský průmysl – řezání papíru, fólií, buničiny (bezprašná pracoviště bez nebezpečí elektrostatických výbojů)
- Obuvnický průmysl – řezání kůže a plastických hmot
- Potravinářský průmysl – dělení potravin v syrovém i zmraženém stavu (zelenina, ovoce, čokolády, sýry, maso, atd.)
- Sklářský průmysl – řezání, vrtání a matování všech druhů skel, tvarové řezy
- Automobilový průmysl – dělení 3D součástek (např. přístrojové desky, nádrže, nárazníky, karoserie)
- Jaderná energetika – dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin
- Vojenský průmysl – odminování, demilitarizace (zneškodňování raketových municí, binárních chemických zbraní a jednosložkových chemických zbraní), dělení pancéřů pro obrněná vozidla. [1] [2] [21]



2.11 Bezpečnost práce s vodním paprskem:

Řezání vodním paprskem je bezpečný způsob řezání materiálu, ale musíme při práci dodržovat určitá pravidla:

- Nedávat ruce do nádrže když probíhá řezání vodním paprskem
- Používat ochranné brýle proti abrazivním částicím
- Používat chrániče sluchu, když vodní paprsek neřeže pod hladinou
- Používat ochranné přípravky, aby se minimalizoval obsah bakterií v zásobníku
- Nosit s sebou zdravotní kartičku, která ukazuje, jak ošetřit poranění vodním paprskem.
- Nešlapat na podporu materiálu
- Nevytvářet si vlastní vysokotlaké díly zařízení, pokud nejste odborník na vysokotlaká zařízení.
- Nakládat a vykládat materiál pomocí zvedacího zařízení, aby se zabránilo poranění o ostré podpůrné lamely. [6] [9] [22]

Zranění vzniklá vodním paprskem:

Vodní či abrazivní paprsek je velice nebezpečný a práce s ním vyžaduje dodržovat maximální bezpečnost. Při práci s vodním paprskem musí mít pracovník ochranný oblek, který chrání před kontaktem s paprskem. Největší riziko představuje abrazivní vodní paprsek, který je schopen snadno rozřezat kteroukoliv lidskou tkáň. Paprsek díky svým přísadám může způsobit i závažnou infekci či otravu krve. [6] [9]

3. Pulsující vodní paprsek:

3.1 Technologie vysokorychlostního pulsujícího paprsku:

Pracovníci Ústavu geoniky AV ČR (obr. 3.1) v laboratoři experimentálně ověřili, že generováním dostatečně velkých tlakových pulsací tlakové kapaliny před výstupem z trysky je možno vytvářet kapalinový pulsující paprsek. Vysokorychlostní pulsující paprsek z trysky vystupuje jako kontinuální, díky tlakovým pulzacím však vytéká z trysky proměnnou rychlostí. Rychlejší části paprsku v určité vzdálenosti od výstupu z trysky „dostihnou“ části pomalejší, čímž se původně kontinuální paprsek rozčlení na jednotlivé pulzy („kapky“). Při dopadu jednotlivých pulzů pulsujícího paprsku se na dopadové ploše cyklicky generuje impaktní tlak. Dochází také k únavovému a smykovému namáhání materiálu cyklickým zatěžováním dopadové plochy a působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To dále zvyšuje účinnost pulsujícího kapalinového paprsku v porovnání s paprskem kontinuálním. [23]



Obr. 3.1 Ústav geoniky Ostrava

Výzkum pulsujících vodních paprsků byl v Ústavu geoniky zahájen v roce 2000. Postupně byla vyvinuta a testována originální metoda generování pulzujícího kapalinového paprsku, založená na vytváření akustických vln působením akustického budiče na tlakovou kapalinu a jejich přenosu vysokotlakým systémem k trysce. Touto metodou je možno vytvořit pulsující paprsek generující desítky tisíc pulsů za vteřinu. Výsledky dlouhodobého výzkumu v oblasti studia zákonitostí šíření akustických vln (či vysokofrekvenčních tlakových pulsací) v kapalině vysokotlakým systémem, jejich vlivu na generování

a vlastnosti pulsujícího vodního paprsku a působení pulsujících paprsků na materiály vedly k udělení několika patentů nejen v ČR, ale i v zahraničí. [24]

3.2 Dopad kapaliny na pevný povrch:

Při dopadu kapaliny pohybující se vysokou rychlostí na tuhé těleso vzniká v místě dopadu kapaliny na povrch výrazný nárůst tlaku. Tento jev může způsobit vážné poškození materiálu, jak na povrchu, tak i ve vnitřní struktuře. [24]

Dopad kapaliny na pevný povrch probíhá ve dvou fázích. V první fázi se kapalina chová jako stlačitelná a generuje díky tzv. hydraulickému rázu impaktní tlak, který je zodpovědný za velkou část poškození způsobeného nárazem kapaliny na pevný povrch. Impaktní tlak p_i v ose dopadu je obecně dán vztahem [24]

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1+\rho_2c_2} \quad [\text{Pa}]$$

kde v je rychlost kapaliny, ρ_1 a ρ_2 jsou hustoty a c_1 a c_2 rychlosti šíření rázové vlny (ρ_1 a c_1 pro kapalinu, ρ_2 a c_2 pro pevnou látku).

Jakmile odezní impaktní tlak, začíná druhá fáze dopadu kapaliny. Kapalina začíná proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy ve chvíli, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny. Rychlost radiálního toku kapaliny může být až pětinasobně vyšší než je dopadová rychlost kapaliny. Na povrch materiálu působí nejen normálové síly od dopadu paprsku, ale i síly smykové. V případě nerovného nebo porušeného povrchu může radiální proudění kapaliny vyvolat tak vysoké smykové síly, že jsou schopny vytvořit lokální smykové trhliny i na povrchu vysoce pevných materiálů.

V průběhu druhé fáze dopadu kapaliny na pevný povrch se kapalina chová jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší tzv. Bernoulliho stagnační tlak p_s , který pak trvá relativně dlouhou dobu. Stagnační tlak je dán výrazem:

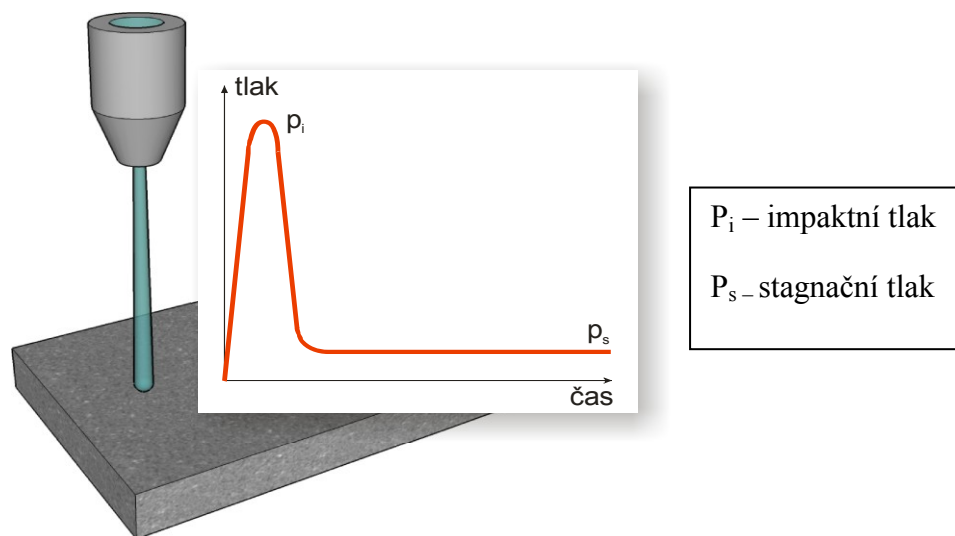
$$p_s = \frac{1}{2} \rho_1 v^2 \quad [\text{Pa}]$$

Impaktní tlak p_i je mnohonásobně vyšší než stagnační tlak p_s a poměr jejich velikostí je možno zjednodušeně vyjádřit vztahem: [23] [24]

$$\frac{p_i}{p_s} \doteq 2 \frac{c_1}{v} \doteq \frac{2960}{v}$$

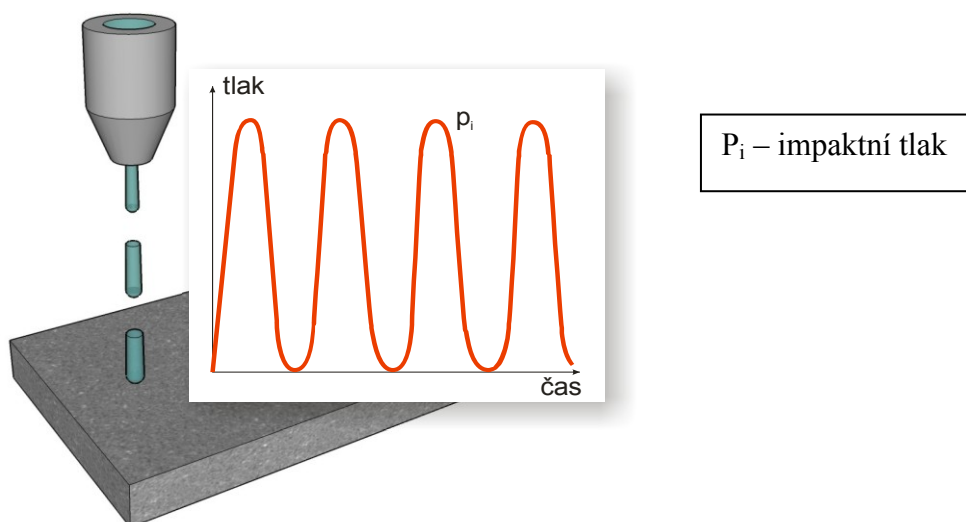
3.3 Rozdíl mezi pulzujícím a normálním kontinuálním paprskem:

U kontinuálního vodního paprsku v průběhu cyklu řezání se tlak nejprve rovnoměrně zvyšuje, dokud nedosáhne maxima a poté rovnoměrně klesá, než dosáhne konstantní hodnoty, kterou si udržuje do konce cyklu řezání (obr. 3.2). [23]



Obr 3.2 Řezání čistým vodním paprskem

Naopak v průběhu cyklu obrábění pulzujícím vodním paprskem tlak nejprve rovnoměrně vzrůstá, dokud nedosáhne maximální hodnoty a poté rovnoměrně klesá až na nulu a následně se celý cyklus periodicky opakuje (obr. 3.3). [23] [24]



Obr 3.3 Řezání pulzujícím vodním paprskem

Kontinuální vodní paprsek působí na materiál v podstatě pouze stagnačním tlakem, na rozdíl od pulzujícího vodního paprsku, který je schopný vyvolat při dopadu také impaktní tlak a využít tak jevy doprovázející dopad kapaliny na pevný povrch materiálu ke zvýšení účinků vysokorychlostních vodních paprsků. [24]

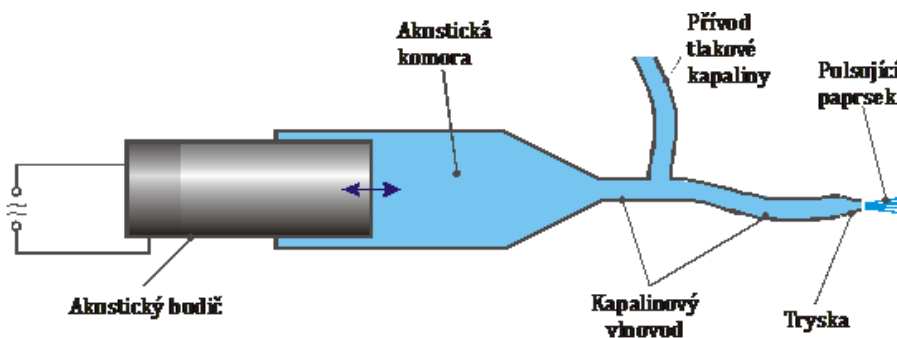
3.4 Generování pulzujícího paprsku:

Pulzující vodní paprsek lze generovat několika způsoby. Dva z nich jsou uvedeny dále:

- Generování pomocí rotačního kotouče s otvory
- Generování pomocí akustického budiče

Rotačního kotouče s otvory pro generování pulzujícího vodního paprsku slouží jako záklapka. Kotouč se postupně danou rychlostí otáčí a přes jednotlivé otvory prochází vodní paprsek.

Při použití akustického budiče se tlakové pulzace generují v akustické komoře, která je naplněna tlakovou kapalinou. Tyto pulzace se zesilují mechanickým zesilovačem pulzací a kapalinovým vlnovodem jsou přiváděny do trysky, kde se tlakové pulzace mění na pulzace rychlostní. K efektivnímu přenosu energie pulzů z generátoru do trysky se využívá stlačitelnost kapaliny spolu s naladěním akustického systému (obr. 3.4) [25] [26]



Obr. 3.4. Schéma vysokotlakého systému s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací

3.5 Účinky pulsujících vodních paprsků na materiály:

Účinky pulsujících vodních paprsků byly testovány v Ústavu geoniky na různých typech materiálů, jako jsou kovy, horniny a betony. Testované materiály byly vystaveny působení různých druhů paprsků, a to jednoduchých válcových a plochých pulsujících paprsků a rotujících pulsujících paprsků. Účinky pulsujících vodních paprsků na materiál byly vyhodnoceny pomocí hloubky řezu, hmotnostního nebo objemového úbytku materiálu a porovnávány s účinky kontinuálních vodních paprsků za stejných pracovních podmínek.

Získané výsledky jednoznačně prokázaly výrazně vyšší dezintegrační účinky pulsujících vodních paprsků na testované materiály v porovnání s paprsky kontinuálními [23] [26]

3.6 Výhody pulsujících vodních paprsků:

Stejně jako u kontinuálních paprsků, kromě toho však nabízejí:

- Výrazně **vyšší výkonnost** v porovnání s kontinuálními paprsky
- Možnost **využití** výrazně **nižších pracovních tlaků** k dosažení stejných výsledků
⇒ nižší náklady na pořízení a provoz vysokotlakých zařízení [23]

3.7 Využití pulsujících vodních paprsků:

Pulsující vodní paprsky nacházejí své místo v mnoha aplikacích, kde se již technologie vysokorychlostních vodních paprsků využívá. Pulsující vodní paprsky se mohou uplatnit ve strojírenství ke zpevňování povrchů místo kuličkování, zatímco v automobilovém průmyslu se uvažuje o aplikaci pulzujících paprsků např. k odstraňování otřepů po obrábění vnitřních prostor bloku válců motorů. Ve stavebnictví lze s výhodou používat pulsující vodní paprsky k odstraňování porušených vrstev betonu při sanacích betonových konstrukcí a k přípravě povrchů před nanášením správkových materiálů. Velký aplikační potenciál má rovněž využití pulsujících vodních paprsků při čištění a odstraňování povrchových vrstev a nánosů, např. v loděnicích k čištění trupů lodí nebo



v potravinářském průmyslu. Pulsující vodní paprsky mohou být použity také k plošné úpravě povrchů okrasného kamene, protože na rozdíl od klasických mechanických způsobů opracování kamene dokážou povrch zdrsnit, ale současně zachovat jeho estetické vlastnosti.

Nová oblast využití pulsujících vodních paprsků se otvírá v oblasti medicíny. Pulsující vodní paprsky by mohly být využívány k selektivnímu a šetrnému odstraňování měkkých tkání (např. při provádění liposukce) nebo při reimplantacích velkých kloubů k odstranění kostního tmele používaného k fixaci implantátu v kostech. [23]

4. Nástřiky na kovové materiály:

Aplikace nástřiků patří k důležitým technologiím povrchových úprav, protože zajišťuje ochranu proti korozi, ovlivňuje vnější vzhled výrobků a jejich funkční vlastnosti. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá hodnocením odstraněných vrstev povlaků, které byly vytvořeny žárovými nástřiky, budu se v této kapitole zmíněnou technologií blíže zabývat. [27]

4.1 Princip žárových nástřiků:

Žárový nástřik je částicový proces vytváření povlaků, kdy je nanášený materiál ve formě prášku (případně drátu) přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. Po dopadu na povrch materiálu dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému utuhnutí. Tím se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi. Technologický proces zaručuje teploty povlakované součásti hluboko pod teplotou fázově-strukturních přeměn (cca 80 – 120 °C), což brání nežádoucím deformacím součásti. [27]

Žárové nástřiky vyžadují samostatnou přípravu povrchu. Pro povlaky do tloušťky 0,7 mm se povrch zdrsňuje otryskáním a pro hrubé povlaky se zdrsňuje řeznými nástroji. [27]

Vlastnosti žárově stříkaných povlaků jsou závislé na chemickém složení materiálu, na typu technologie stříkání, na volbě parametrů nástřiku a s tím související strukturou povlaku. [28]



4.2 Rozdělení metod žárového stříkání:

Podle typu přídavného materiálu:

- Žárové stříkání z drátu
- Žárové stříkání z tyčinek
- Žárové stříkání z kordů
- Žárové stříkání z prášku
- Žárové stříkání roztaveného kovu

Podle charakteru operace:

- Ruční nástřik
- Mechanizovaný nástřik
- Automatický nástřik

Podle nositele energie:

- Žárový nástřik rozprašováním taveniny
 - Nástřik roztaveného kovu
- Žárový nástřik s využitím kapalných nebo plynných paliv
 - Nástřik plamenem z drátu
 - Nástřik vysokorychlostním plamenem z drátu
 - Nástřik plamenem z prášku
 - Nástřik vysokorychlostním plamenem
 - Detonační nástřik
- Žárový nástřik s využitím expanze vysoce stlačených plynů bez spalování
 - Nástřik za studena
- Žárový nástřik s využitím elektrického oblouku nebo výboje v plynech
 - Nástřik elektrickým obloukem
 - Nástřik elektrickým obloukem s ochranným plynem
 - Plasmatický nástřik na vzduchu
 - Plasmatický nástřik s ochranným plynem
 - Plasmatický nástřik v komoře ve vakuu
 - Plasmatický nástřik v komoře při tlaku přesahujícím jeden bar



- Plasmatický nástřik s kapalinovou stabilizací
- Indukční plasmatický nástřik
- Žárový nástřik s využitím svazku světelných paprsků
 - Nástřik laserem [27] [29]

4.3 Způsoby aplikace žárového nástřiku kovů:

Existuje několik způsobů jak žárové nástřiky aplikovat na daný povrch materiálu:

- Nástřik roztaveným kovem
- Nástřik práškovým kovem
- Nástřik drátovou pistolí

Nástřik roztaveným kovem:

Tento nástřik se používá pro kovy, u kterých teplota tavení nepřesahuje 600 °C. Zařízení pro tento způsob nanášení nástřiku má oddělený tavící prostor a vlastní rozprašovací zařízení, ve kterém se stlačeným vzduchem nebo inertním plynem přitékající tavenina rozptyluje do drobných částic a vrhá se na povrch základního materiálu. Uvedená metoda se používá jen pro nástřik olovem na ochranu chemických zařízení. [27] [29]

Nástřik práškovým kovem:

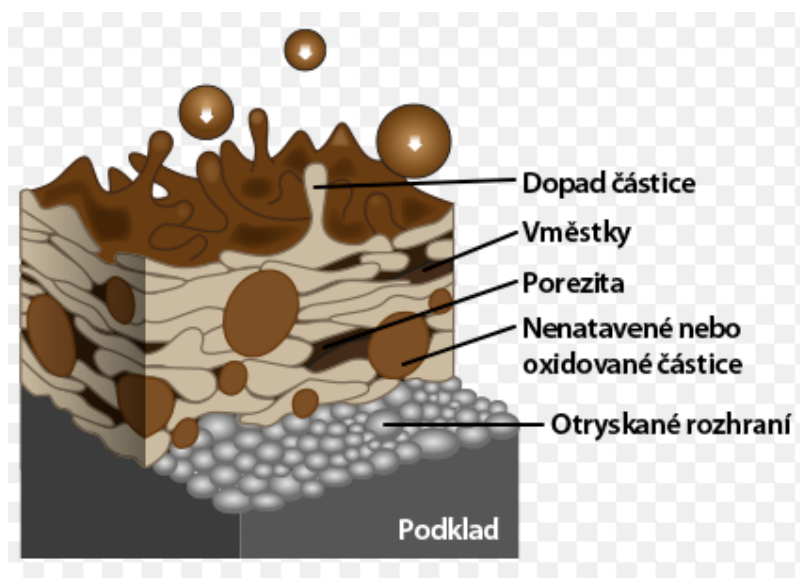
Nástřik se používá v případě, kdy nástřikovaný kov nelze zhotovit ve formě drátu nebo když výroba kovového prášku je příliš jednoduchá. Zařízení pro nástřik práškovým kovem je ve formě ručních nebo strojních pistolí s kyslíkoacetylenovým hořákem. V těchto pistolích se kovové částice průchodem přes plamen natavují a proudem stlačeného vzduchu nebo jiného plynu se vrhají na základní kov. Nástřik práškovými kovy se používá převážně pro výrobu povlaků z pseudoslitin nebo při nástřiku směsí kovů s další teplenou úpravou povlaku. [27] [29]

Nástřik drátovou pistolí:

Pro nástřik drátovou pistolí se používá nastřikovaný materiál ve formě drátu. Zařízení pro nástřik je ve tvaru pistole a skládá se ze dvou částí a to ze zařízení pro plynulý a rovnoměrný pohyb drátů a ze zařízení pro jeho natavování. Způsob natavování drátu může být buď kyslíkoacetylenovým hořákem nebo elektrickým obloukem. Po dopadu tekutých nebo polotekutých částic na povrch základního materiálu se tyto částice deformují do tvaru plochých destiček.[27]

4.4 Struktura žárového nástřiku:

Povlaky vytvořené technologií žárového nástřiku jsou tvořeny lamelární strukturou (obr. 4.1). Struktura je tvořena splatey, (což jsou deformované natavené částice) nenatavenými popř. jen částečně natavenými částicemi, oxidickými částicemi a póry. Při dopadu natavených částic na povrch materiálu dochází vlivem vysoké rychlosti ochlazování částic ke krystalizaci zrn. Vysoká rychlost ochlazování natavených částic také zabraňuje segregaci rovnovážných fází. Nastavením hlavních parametrů žárového nástřiku je ovlivněna pórovitost i obsah oxidů ve struktuře povlaku. [29]



Obr 4.1 Struktura žárového nástřiku



Množství oxidických vměstků ve struktuře a pórovitost velmi ovlivňuje výsledné vlastnosti povlaku. Oxidické vměstky ve struktuře žárového nástřiku zvyšují tvrdost vrstev, jejich nadměrné množství však způsobuje křehkost povlaku. Pórovitost snižuje hodnotu soudržnosti a způsobuje odlupování nebo praskání vrstev povlaku. Ve struktuře povlaku se nejčastěji objevuje přítomností nenatavených, nebo špatně natavených částic. Pórovitost zhoršuje kvalitu a snižuje tvrdost povlaku. [29]

4.5 Vlastnosti žárového nástřiku:

Vlastnosti povlaků vytvořené žárovými nástřiky je možné ovlivnit přidáním materiálem, vhodným nastavením procesních parametrů, obsahem oxidických vměstků a pórovitostí ve struktuře, kvalitou přilnavosti, soudržnosti splatů atd. Vytvářením žárových nástřiků různými technologiemi dostáváme povlaky s odlišnými mechanickými vlastnostmi.

Mezi vlastnosti, kterými jsou žárové nástřiky nejčastěji posuzovány, patří:

- Pevnost povlaku
- Odolnost proti vysokým teplotám
- Odolnost proti mechanickému opotřebení
- Odolnost proti korozi a oxidaci
- Obrobitelnost
- Elektrické vlastnosti
- Přilnavost povlaku k substrátu
- Tvrdost
- Magneto-optické vlastnosti [28]



4.6 Využití žárových nástřiků:

Povlaky, které jsou vytvářeny žárovými nástřiky, je možné aplikovat na všechny běžné konstrukční materiály (slitiny železných i neželezných kovů), dále pak i na jiné materiály, jakou jsou např. dřevo, papír, sádra, plastické hmoty, sklo, keramika, tkanina atd. Žárové nástřiky nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. [29]

Nejčastěji jsou využívány pro:

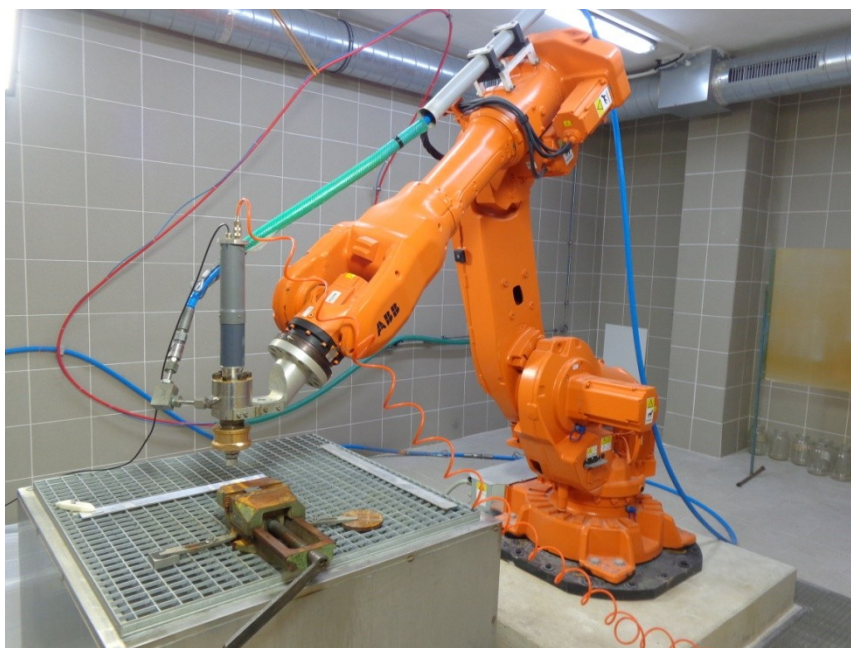
- Automobilový průmysl
- Čerpací techniku
- Energetiku
- Hutní průmysl
- Letecký průmysl
- Opravárenství
- Sklářský průmysl
- Těžké strojírenství
- Tiskařský průmysl
- Všeobecné strojírenství [27] [29]

5. Experimentální zkoušky odstraňování žárových nástřiků

Experimentální zkoušky odstraňování žárových nástřiků byly provedeny v Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě s odbornou pomocí pracovníků Oddělení desintegrace materiálů.

5.1 Popis použitého zařízení na odstraňování žárových nástřiků a vyhodnocování odstraněných objemů:

Vysokotlaké plunžrové čerpadlo Hammelmann HDP 253 (maximální pracovní tlak 160 MPa, maximální průtok vody 67 l/min) sloužilo jako zdroj vysokotlaké vody při odstraňování nástřiků vodními paprsky. Použitá řezná hlava umožňovala generování pulzujícího paprsku vytvářením tlakových pulzací uvnitř vysokotlaké kapaliny pomocí ultrazvukového generátoru pulzů (frekvence 20 kHz). Hlava byla osazena vodní tryskou Hammelmann 10-20 o ekvivalentním průměru 2 mm pro vytváření plochého vodního paprsku s úhlem rozstříku 10°. Pro manipulaci s řeznou hlavou byl využit šestiosý robot ABB IRB 6640-180/2.55 Master (viz obr. 5.1). K bezkontaktnímu zjišťování objemů nástřiků odstraněných vodními paprsky sloužil profilometr MicroProf FRT s měřicím senzorem využívajícím zdroje bílého světla.



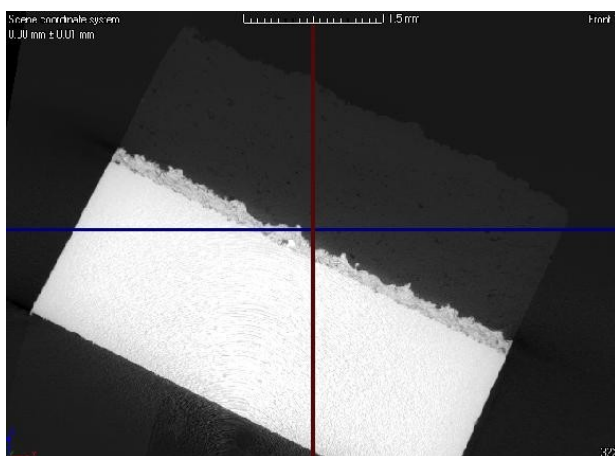
Obr. 5.1 Řezná hlava ke generování pulzujícího vodního paprsku a robot ABB – zařízení použité při odstraňování nástřiků

5.2 Způsob zobrazení struktury žárových nástřiků pomocí CT tomografie:

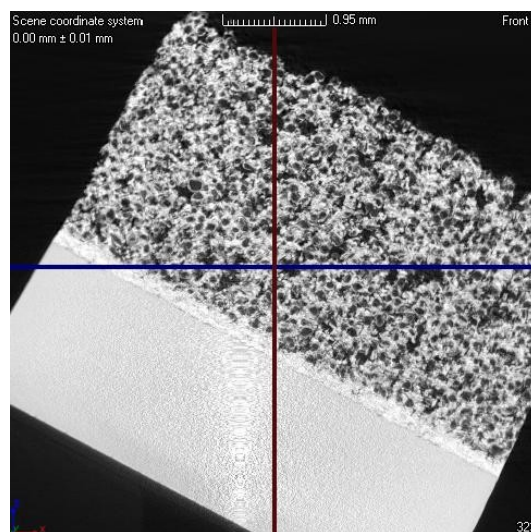
V současné době se rentgenová počítačová tomografie stále častěji využívá pro analýzu různých typů materiálů. Nejdříve se tato metoda začala využívat v lékařství a postupem času našla své uplatnění také ve strojírenství. [30]

Průmyslová rentgenová počítačová mikrotomografie využívá různých vlastností rentgenového záření při interakci s vlastní hmotou zkoumaných materiálů. Pro rekonstrukci objemu materiálu se musí pořídit v průběhu skenovacího procesu daného objektu sada 2D radiografických projekcí (při známém úhlu pootočení) během rotace objektu o 360 stupňů. 2D radiografické projekce jsou pořizovány detektorem rentgenového záření. Radiografický snímek zobrazuje 2D mapu pixelů udávající v různých odstínech šedi intenzitu utlumených i neutlumených rentgenových paprsků, které prochází zkoumaným objektem. CT objem objektu je rekonstruován pomocí výpočetních algoritmů z dostatečného množství radiografických projekcí. [30]

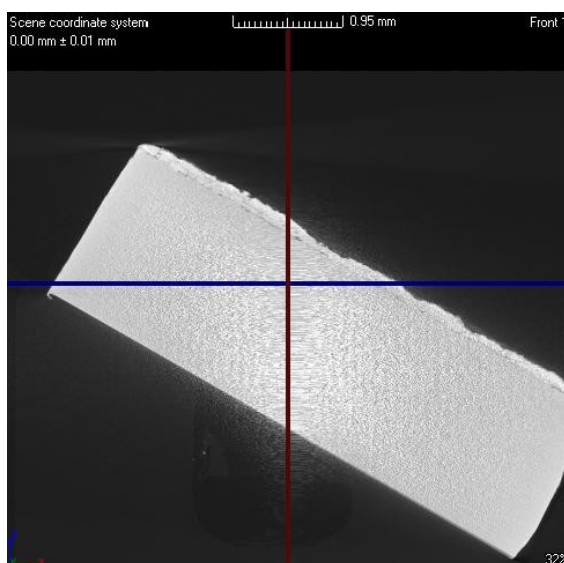
Zobrazení struktury vzorků s žárovými nástřiky bylo provedeno v Ústavu geoniky AV ČR, za pomoci průmyslového rentgenového počítačového mikro-tomografu od firmy Nikon Metrology. Jedná se o plně automatizovaný systém umožňující rotační skenování, vybavený mikrofokálním zdrojem rentgenového záření, který vyzařuje kónický svazek paprsků. Zdejší tomografická laboratoř je vybavena také příslušným rekonstrukčním a vizualizačním softwarem.



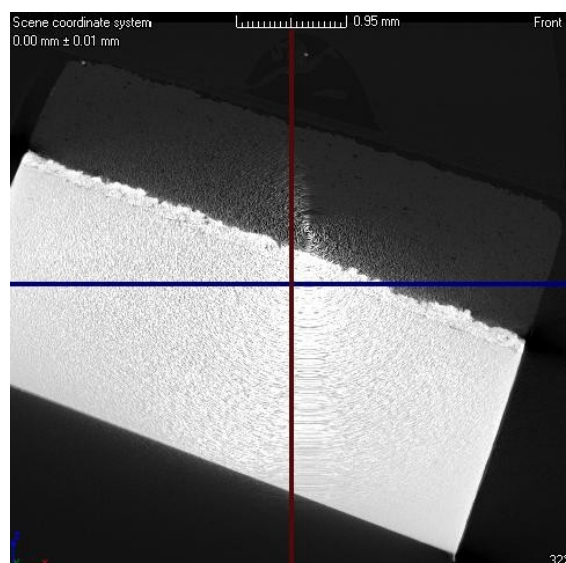
Obr. 5.2 Obrusitelný hliníkový nástřik



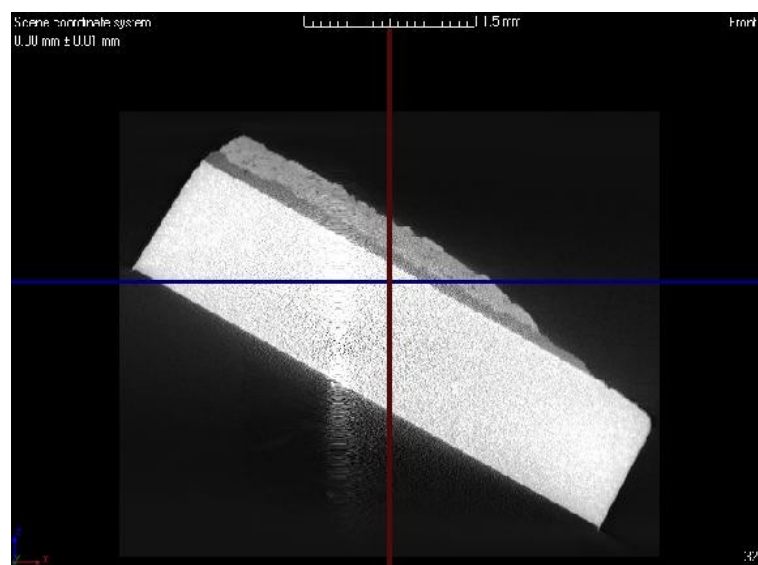
Obr. 5.3 Obrusitelný bentonitový nástřik



Obr. 5.4 Obrusitelný hliníkový nástřik



Obr. 5.5 Obrusitelný polyesterový nástřik



Obr. 5.6 Termální keramická bariéra

Pomocí rentgenové počítačové mikrotomografie byly pořízeny skeny jednotlivých žárových nástřiků včetně podkladového materiálu (obr. 5.2 až 5.6). Ze snímků můžeme vyčíst různé hustoty nástřiků i podkladového materiálu. Černá barva zde zobrazuje nízkou hustotu (vzduch) a naopak jasné bílá hustý a pevný materiál.

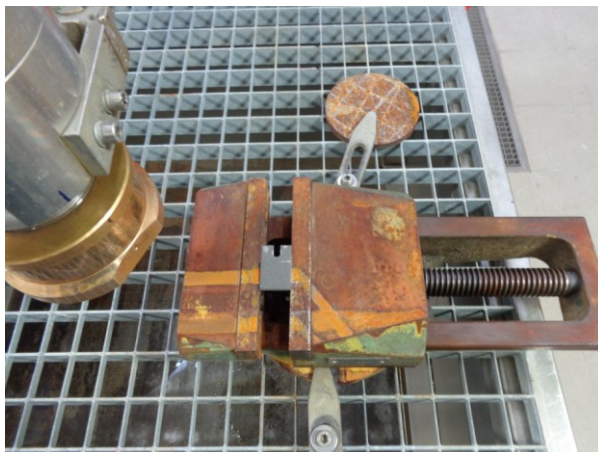
Celkově jsme odstraňovali žárové nástříky z 5 vzorků, jejichž popis je uveden v následující tabulce 1.

Tab. 1. Přehled odstraňovaných žárových nástříků včetně některých vlastností

Typ nástříku	Použitá technologie pro nanesení podkladové vrstvy	Forma materiálu pro odkaldovou vrstvu	Složení podkladové vrstvy	Použitá technologie pro nanesení horní vrstvy	forma materiálu pro horní vrstvu	Složení horní vrstvy
Termální keramická bariéra	Plasma	Powder	Ni - 31 Cr - 11 Al - 0.6Y	Plasma	Powder	Zirconium Oxide 92% + yttrium Oxide 8%
Obrusitelný hliníkový nástřík	Plasma	Powder	4.5% Aluminium + 95.5% Nickel	Plasma	Powder	Silicon 12% + Aluminium Balance
Obrusitelný polyesterový nástřík	Plasma	Powder	4.5% Aluminium + 95.5% Nickel	Plasma	Powder	Silicon Aluminium alloy 12% + Polyester Balance
Obrusitelný bentonitový nástřík	Plasma	Powder	4.5% Aluminium + 95.5% Nickel	Flame spray	Powder	Calcinated Bentonite 21% + Chromium 4% + Aluminum 4% + Nickel Balance
Obrusitelný hliníkový nástřík	Flame spray	Wire	Nickel 80% + Aluminum 20%	Flame spray	Wire	Silicon 6% + Aluminum Balance

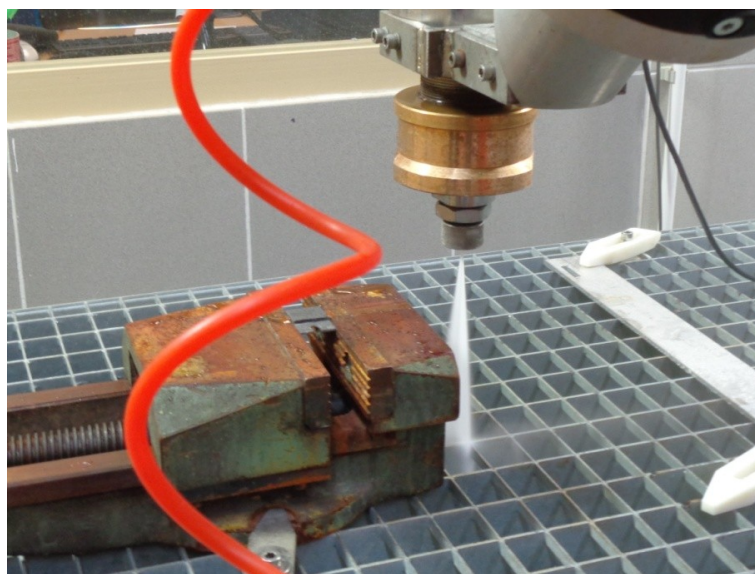
5.3 Popis experimentu odstraňování žárových nástříků:

V ústavu geoniky byly pulzujícím a kontinuálním plochým vodním paprskem odstraňovány žárové nástříky s různými vlastnostmi. Nejprve se připravený vzorek s daným nástříkem ustavil do svěráku (obr. 5.7) a poté se nastavily parametry a typ vodního paprsku.



Obr. 5.7 Ustavení vzorku s nástřikem

Po důkladném se ujištění, že je zkušební vzorek ustaven správně a následném uzavření bezpečnostních dveří od laboratoře určené k obrábění vodním paprskem, proběhlo samotné odstranění nástřiku zvoleným vodním paprskem. Obrábění vodním paprskem je velmi hlučný proces, proto všichni zúčastnění použili chrániče sluchu. Po odstranění vrstvy nástřiku kontinuálním vodním paprskem se zkoumaný vzorek vyjmul ze svěráku a provedlo se odstranění nástřiku pulzujícím vodním paprskem na novém vzorku se stejným žárovým nástřikem. Následovalo označení obrobených vzorků a důkladné vyhodnocení dosažených výsledků.



Obr. 5.8 Plochý vodní paprsek



5.4 Výsledky experimentálních zkoušek:

Pro všechny vodní paprsky, pulzující i kontinuální, byly použity následující řezné podmínky:

Typ trysky: plochá Hammelmann 10-20

Úhel rozstříku: 10°

Frekvence pulzací: 20 KHz

Tlak vody: 20 MPa

Výkon generátoru pulzací: 170 W

Vzdálenost vzorku od trysky: 35mm

Při odstraňování zkoumaných nástřiků se měnily parametry vodních paprsků a to jejich typ a rychlost řezání. Po ukončení experimentu se zjistil objem odstraněného nástřiku pomocí profilometru FRT a dopočítal na 10 mm délky drážky vytvořené vodním paprskem.

Termická keramická bariéra (thermall barrier coating):

Pro odstraňování žárového nástřiku typu termická keramická bariéra, byly použity řezné podmínky z tabulky 2. Výsledné vzorky po aplikaci paprsků jsou na obr. 5.9.

Tab. 2. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u termické keramické bariéry

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	plochý pulzující	10	60	Odstraněn celý nástřik
2	plochý kontinuální	10	6	Odstraněna horní vrstva nástřiku
3	plochý pulzující	50	28	Odstraněn skoro celý nástřik
4	plochý kontinuální	100	22	Nástřik odstraněn částečně



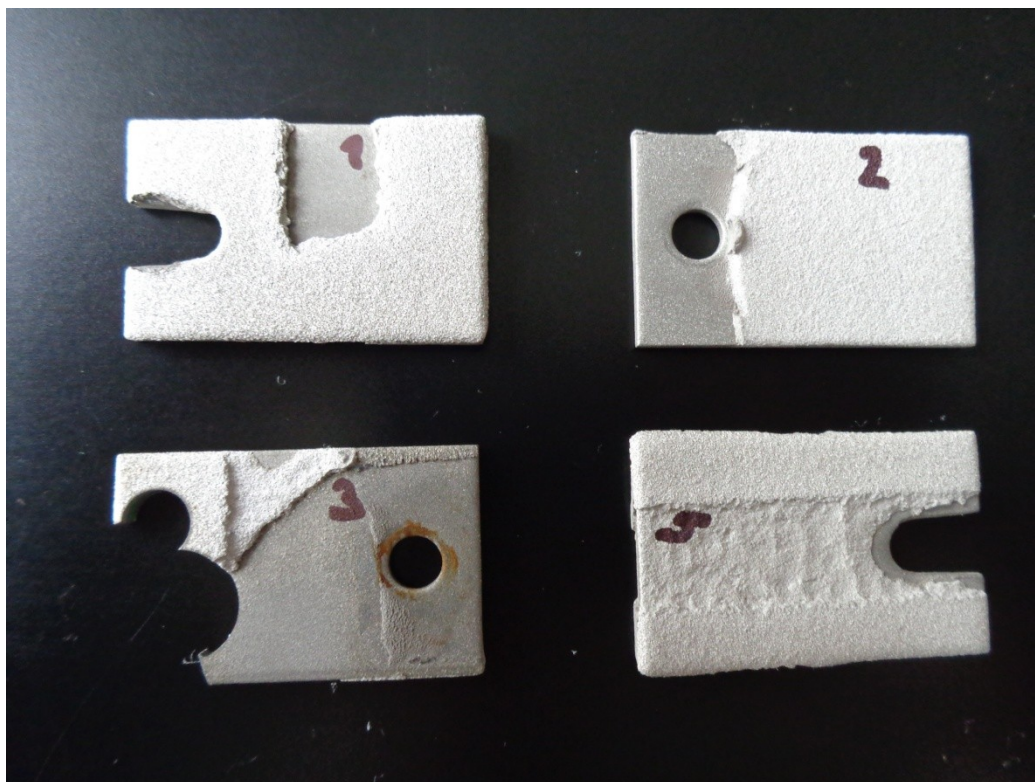
Obr. 5.9 Žárový nástřik termickou keramickou bariérou

Obrusitelný hliníkový nástřik s 12% silikonu (Abradable Al coating)

Pro odstranění hliníkového nástřiku s obsahem 12% silikonu byly použity řezné podmínky z tabulky 3. Výsledné vzorky po aplikaci paprsků jsou na obr. 5.10.

Tab. 3. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrusitelného hliníkového nástřiku s 12% silikonu

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	ploché pulzující	0,2	150	Odstraněn celý nástřik
2	ploché kontinuální	0,2	22	Odstraněna horní vrstva nástřiku
3	ploché pulzující	0,5	91	Při upevnění vzorku nástřik prasknul
4	ploché pulzující	0,3	115	Odstraněn skoro celý nástřik



Obr. 5.10 Obrusitelný hliníkový nástřík s obsahem 12% silikonu

Obrusitelný hliníkový nástřík 6% silikonu

Pro odstranění obrusitelného hliníkového nástříku s obsahem 6% silikonu byly použity řezné podmínky z tabulky 4. Výsledné vzorky po aplikaci paprsků jsou na obr. 5.11.

Tab. 4. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrusitelného hliníkového nástříku s 6% silikonu

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	plochý pulzující	0,5	141	Odstraněn skoro celý nástřík
2	plochý pulzující	0,1	-	Nástřík odpadl při najetí paprsku
3	plochý kontinuální	0,1	41	Odstraněna horní vrstva nástříku



Obr. 5.11 Obrusitelný hliníkový nástřik s obsahem 6% silikonu

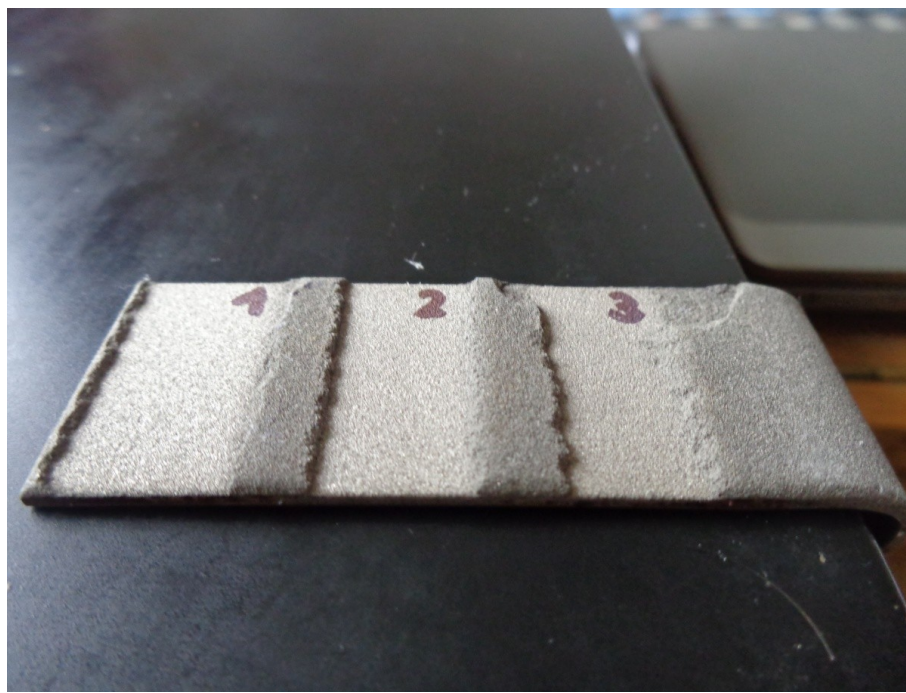
Obrusitelný polyesterový nástřik:

Pro odstranění obrusitelného polyesterového nástřiku byly použity tři vzorky (A, B, C), přičemž na každém vzorku bylo provedeno více řezů. Použité typy vodních paprsků a jejich parametry jsou uvedeny v tabulkách 5 až 7. Vzorky po aplikaci paprsků jsou znázorněny na obr. 5.12 až 5.14.

Vzorek A:

Tab. 5. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrusitelného polyesterového nástřiku

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	ploché pulzující	10	249	Odstraněn celý nástřik
2	ploché kontinuální	10	166	Nástřik odstraněn částečně
3	ploché kontinuální	100	158	Nástřik odstraněn částečně



Obr. 5.12 Vzorek A s obrusitelným polyesterovým nástřikem

Vzorek B:

Tab. 6. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrusitelného polyesterového nástřiku

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	ploché kontinuální	200	104	Nástřik odstraněn částečně
2	ploché pulzující	200	146	Odstraněn skoro celý nástřik
3	ploché pulzující	150	158	Odstraněn skoro celý nástřik
4	ploché kontinuální	150	148	Odstraněn skoro celý nástřik

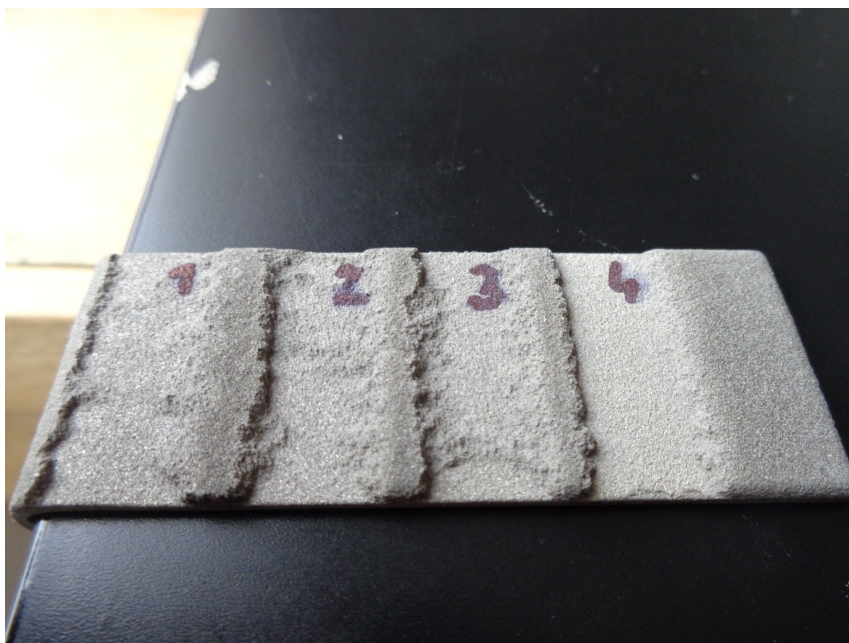


Obr. 5.13 Vzorek B s obrušitelným polyesterovým nástřikem

Vzorek C:

Tab. 7. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrušitelného polyesterového nástřiku

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	plochý kontinuální	175	139	Statistika - pokus 1
2	plochý kontinuální	175	143	Statistika - pokus 2
3	plochý kontinuální	175	142	Statistika - pokus 3
4	plochý pulzující	175	150	Odstraněn celý nástřik



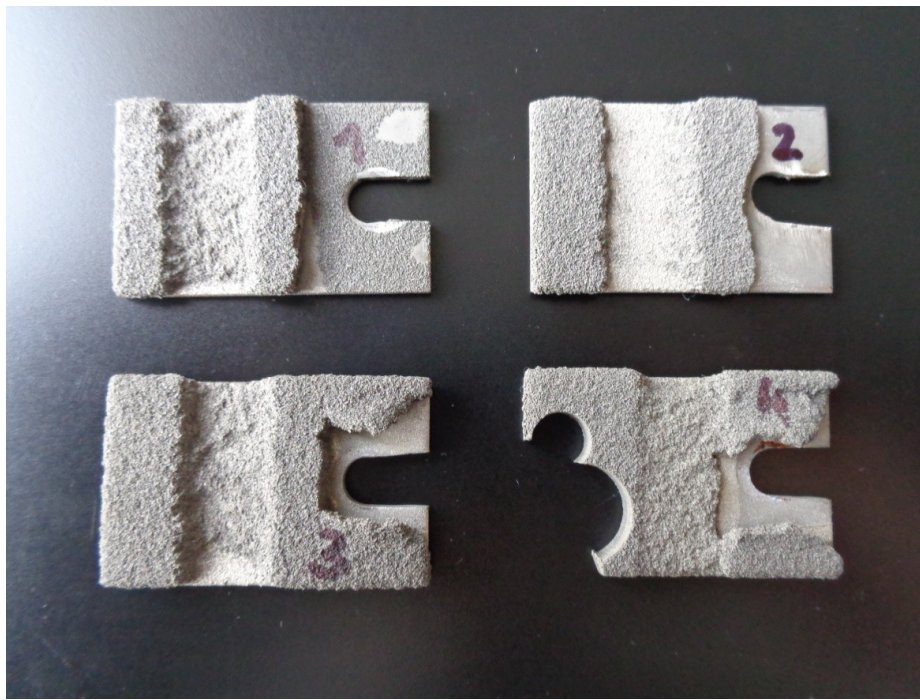
Obr. 5.14 Vzorek C s obrusitelným polyesterovým nástřikem

Obrusitelný bentonitový nástřik (Abradable Bentonite coating):

Pro odstranění obrusitelného bentonitového nástřiku byly použity řezné podmínky z tabulky 8. Vzorky po aplikaci paprsků jsou znázorněny na obr. 5.15.

Tab. 8. Nastavené rychlosti a odstraněné objemy pro jednotlivé řezy u obrusitelného bentonitového nástřiku

Číslo řezu drážky	Typ paprsku	Rychlost řezání [mm/s]	Odstraněný objem na 10 mm délky drážky	Poznámka
1	plochý kontinuální	100	215	Skoro celý nástřik odstraněn
2	plochý pulzující	100	260	Celý nástřik odstraněn
3	plochý pulzující	200	222	Skoro celý nástřik odstraněn
4	plochý kontinuální	200	160	Nástřik odstraněn částečně



Obr. 5.15 Obrusitelný bentonitový nástřík

6. Analýza a interpretace zjištěných poznatků:

Testované žárové nástříky byly vystaveny působení pulzujících i kontinuálních vodních paprsků. Účinky pulzujících vodních paprsků na materiál byly vyhodnoceny pomocí hloubky řezu a objemového úbytku materiálu a porovnávány s účinky kontinuálních vodních paprsků (tedy bez pulzací), které pracovaly za stejných pracovních podmínek.

Vyhodnocení pomocí objemového úbytku materiálu:

Po provedení zkoušek pulzujícím i kontinuálním vodním paprskem se změnilo odstraněné množství daného nástříku. Následující tabulka (tab. 9) obsahuje přehled odstraněných objemů nástříků na 10 mm drážky vytvořené vodními paprsky pro dané typy žárových nástříků.

Tab. 9. Výsledky řezných zkoušek

Druh nástřiku	Rychlost řezání [mm/s]	Typ vodního paprsku	Úbytek materiálu [mm ³]
Termická keramická bariéra	10	Pulzující	60
		Kontinuální	6
Obrusitelný hliníkový nástřik 12% silikonu	0,2	Pulzující	150
		Kontinuální	22
Obrusitelný polyesterový nástřik	10	Pulzující	249
		Kontinuální	166
	150	Pulzující	158
		Kontinuální	148
	175	Pulzující	150
		Kontinuální	139
	200	Pulzující	146
		Kontinuální	104
Obrusitelný bentonitový nástřik	100	Pulzující	260
		Kontinuální	215
	200	Pulzující	222
		Kontinuální	160

Z experimentů vyplynulo, že vzhledem k různým vlastnostem nástřiků a zejména jejich hustotě, tvrdosti a celkové struktuře (kapitola 5.2) bylo nutno při jejich odstraňování výrazně upravit rychlost pohybu paprsku nad jednotlivými vzorky (viz tab. 9).

Pulzující vodní paprsek při rychlosti 10 mm/s dokázal odstranit celou vrstvu nástřiku z termické keramické bariéry, zatímco kontinuální paprsek odstranil pouze vrchní část nástřiku. Z daných úběrů materiálu vyplývá, že pulzující vodní paprsek má při odstraňování nástřiku z termické keramické bariéry mnohonásobně vyšší účinky než kontinuální vodní paprsek.

U obrusitelného hliníkového nástřiku s obsahem 12% silikonu dokázal pulzující vodní paprsek při rychlosti 0,2 mm/s opět odstranit celý nástřik, stejně jako u termické keramické bariéry. Kontinuální vodní paprskem pak odstranil pouze 22 mm z horní vrstvy nástřiku. Pulzující vodní paprsek zde opět prokázal svou vyšší účinnost, než je tomu u paprsku kontinuálního.

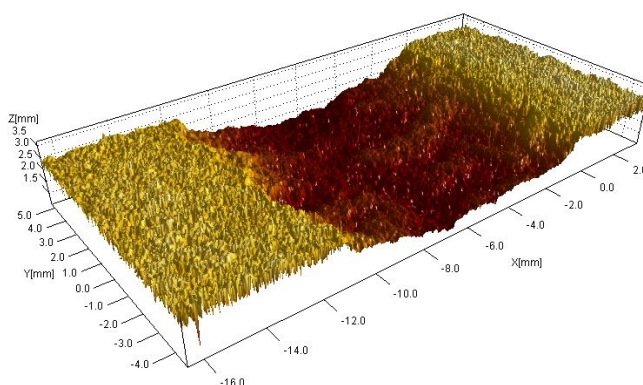
Pro obrusitelný polyesterový nástřik byly provedeny zkoušky se čtyřmi různými rychlostmi řezání a u všech byly prokázány výrazně vyšší účinky pulzujících vodních paprsků v porovnání s paprsky kontinuálními.

Obrusitelný bentonitový nástřik byl odstraněn pulzujícím vodním paprskem s rychlostí řezání 100 mm/s, zatímco kontinuální paprsek při dané rychlosti odstranil nástřik jen částečně. Pro rychlost řezání 200 mm/s pulzující vodní paprsek opět prokázal vyšší účinky než kontinuální.

U hliníkového nástřiku s obsahem silikonu 6% nebylo provedeno porovnání účinků obou paprsků, protože při njetí pulzujícím vodním paprskem rychlostí 0,1 mm/s hliníkový nástřik odpadnul. Při provedení zkoušky kontinuálním vodním paprskem s rychlostí 0,1 mm/s byla odstraněna horní vrstva nástřiku o objemu 41 mm³. Pulzující vodní paprsek s rychlostí 0,5 mm/s odstranil skoro celý nástřik, odstraněná vrstva činila 141 mm³.

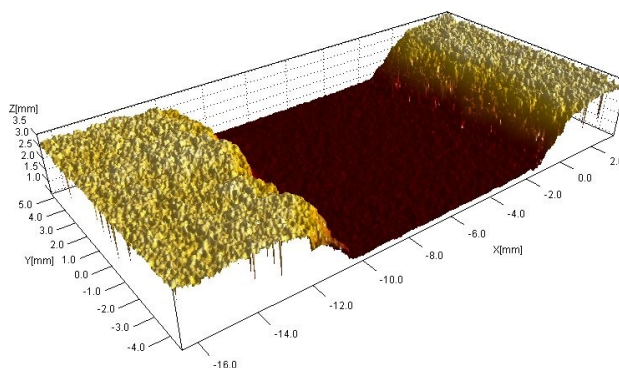
Při odstraňování obrusitelného bentonitového nástřiku bylo dosaženo obdobných výsledků, jako v předchozích případech (viz tabulku 9). Na obr. 6.1 a 6.2 jsou ukázky počítačové rekonstrukce drážek vzniklé působením vodního paprsku. Obrázky byly vytvořeny pro pulzující i kontinuální vodní paprsek s rychlostí řezání 100 mm/s. Z obrázků jsou jasně patrné výrazně vyšší účinky pulzujícího vodního paprsku, který dokázal odstranit téměř celý obrusitelný bentonitový nástřik.

OB-1 40um 3D View.FRT



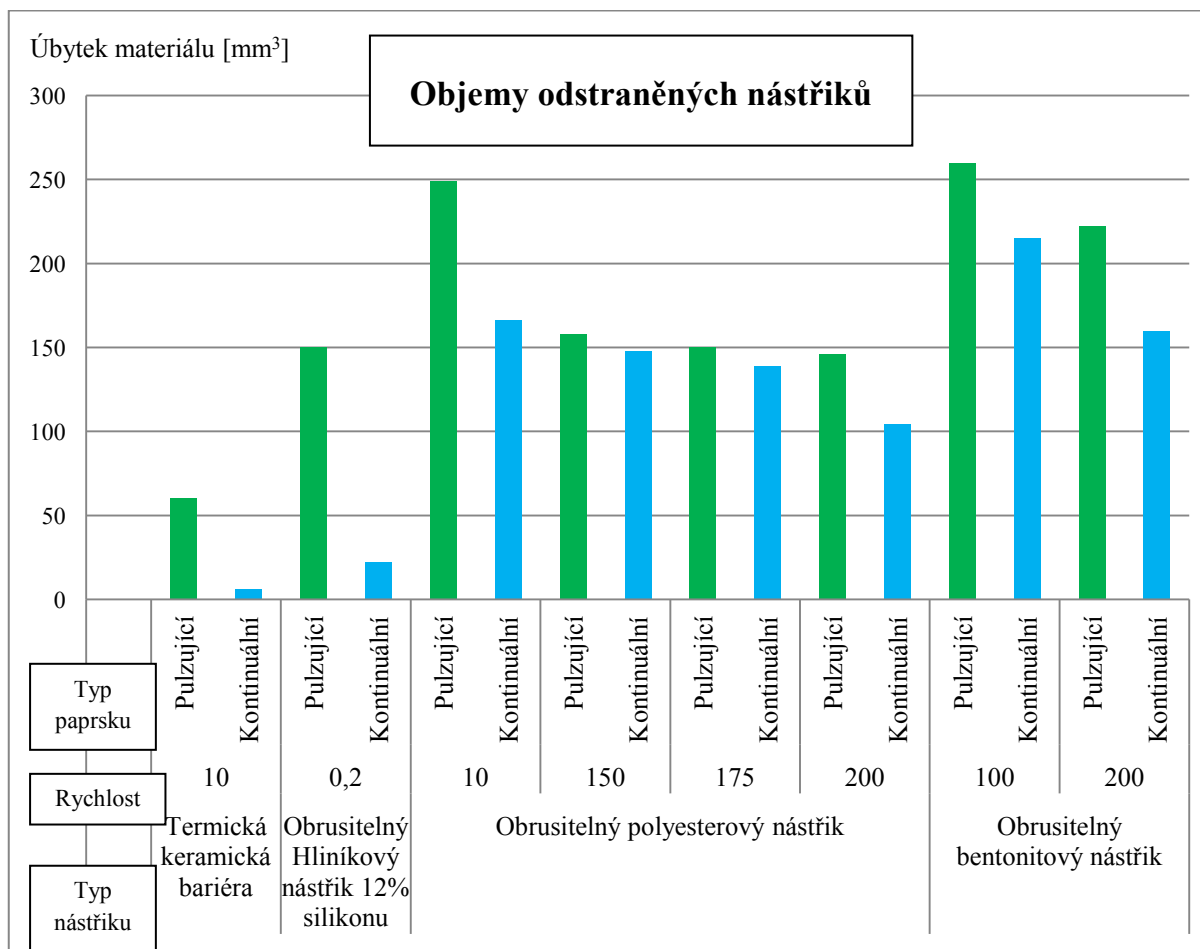
Obr. 6.1 Počítačová rekonstrukce vzorku po odstranění nástřiku kontinuálním paprskem

OB-2 40um 3D View FRT



Obr. 6.2 Počítačová rekonstrukce vzorku po odstranění nástřiku pulzujícím paprskem

Následující graf 1 znázorňuje rozdíly úbytků materiálu žárových nástřiků na 10 mm drážky pro jednotlivé typy žárových nástřiků.



Graf 1. Odstraněné objemy jednotlivých nástřiků

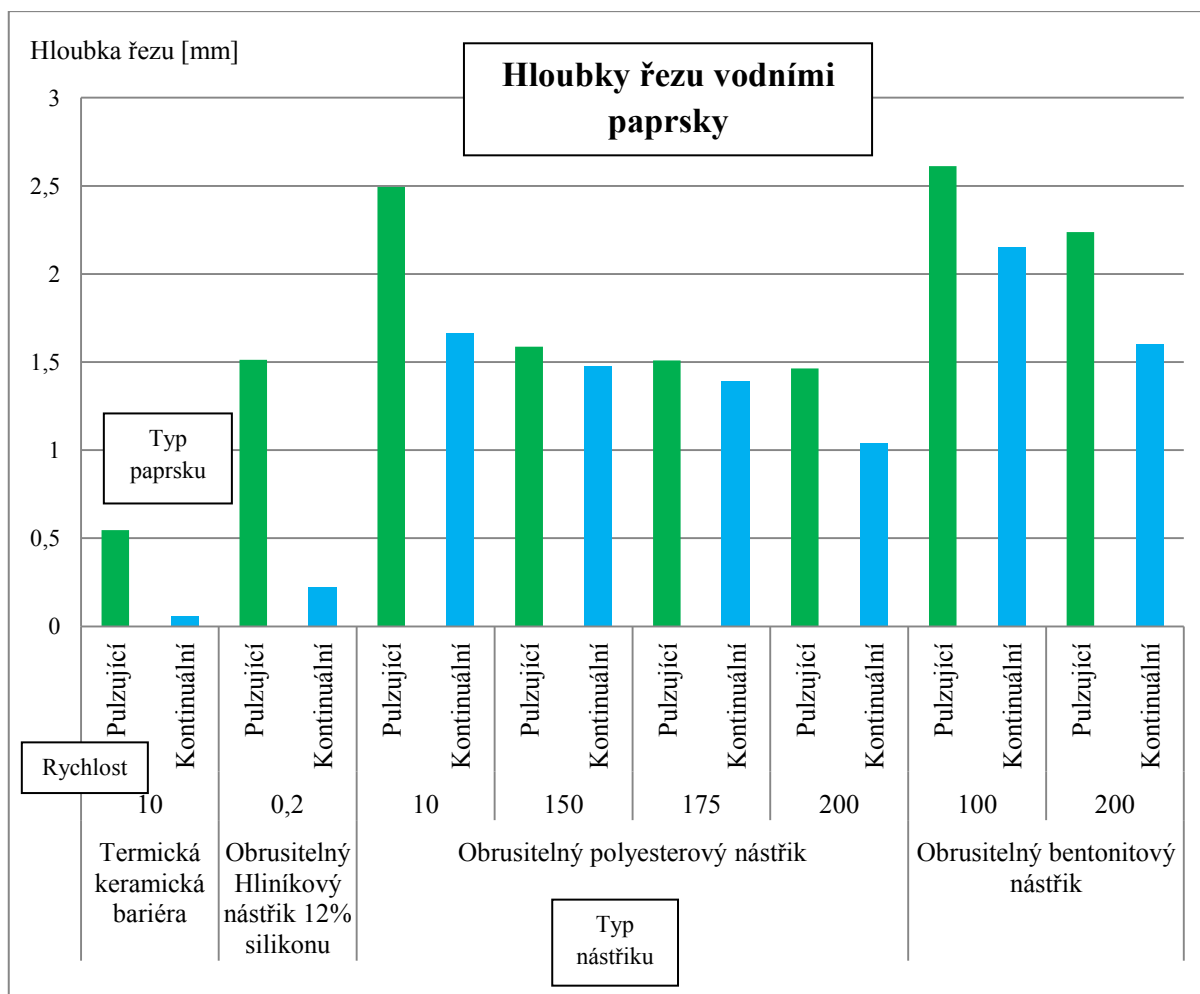
Vyhodnocení pomocí hloubky řezu:

Po provedení zkoušek pulzujícím a kontinuálním vodním paprskem bylo provedeno také vyhodnocení hloubky drážky vzniklé působením vodního paprsku. Následující tabulka 10 obsahuje přehled hloubek řezu pro dané typy žárových nástřiků u jednotlivých vodních paprsků.

Tab. 10. Výsledky řezných zkoušek

Druh nástřiku	Rychlost řezání [mm/s]	Typ vodního paprsku	Hloubka řezu [mm]
Termická keramická bariéra	10	Pulzující	0,547
		Kontinuální	0,058
Obrusitelný Hliníkový nástřik 12% silikonu	0,2	Pulzující	1,512
		Kontinuální	0,220
Obrusitelný polyesterový nástřik	10	Pulzující	2,493
		Kontinuální	1,661
	150	Pulzující	1,587
		Kontinuální	1,479
	175	Pulzující	1,509
		Kontinuální	1,392
	200	Pulzující	1,463
		Kontinuální	1,041
Obrusitelný bentonitový nástřik	100	Pulzující	2,612
		Kontinuální	2,149
	200	Pulzující	2,237
		Kontinuální	1,601

Výsledky jednotlivých hloubek řezu opět prokázaly výrazně vyšší účinky pulzujících vodních paprsků v porovnání s účinky kontinuálních vodních paprsků. Graf 2 znázorňuje rozdíly hloubek drážky pro dané typy žárových nástřiků.



Graf 2. Dosažené hloubky řezů u jednotlivých nástřiků

Oba grafy (graf 1 i graf 2) jsou si velice podobné, což jen potvrzuje skutečnost, že při hodnocení účinků řezání vodními paprsky není nutné vždy zjišťovat odstraněný objem materiálu, často pomocí nákladných měřicích přístrojů a metod, ale pro orientační měření postačí jednoduše zjistit dosaženou hloubku řezu. Z grafů je také zřejmé, že některé měkčí nástřiky (odrusitelný polyesterový nebo bentonitový nástřik) lze poměrně snadno odstranit i běžným kontinuálním paprskem. Rozdíly mezi objemy odstraněnými pulzujícím a vodním paprskem tudíž nejsou příliš velké, podobně dosažené hloubky řezů. Naopak velmi pevné nástřiky (termická keramická bariéra nebo odrusitelný hliníkový nástřik) pomocí kontinuálního paprsku při daných pracovních parametrech není možno odstranit a narušit povrchovou vrstvu lze jen velmi obtížně. Pulzující paprsek je však díky svým vlastnostem při porušování a odstraňování nástřiků mnohem úspěšnější.

Závěr:

Cílem diplomové práce bylo zjistit účinky pulzujících vodních paprsků na žárové nástřiky a porovnat je s účinky kontinuálních vodních paprsků na stejné typy žárových nástřiků. Práce se zabývala především problematikou vodních paprsků, byly však zmíněny i další používané nekonvenční technologie obrábění, do kterých technologie obrábění vodním paprskem spadá. V teoretické části byl podstatný úsek věnován pulzujícím vodním paprskům a také žárovým nástřikům. Experimentální část se pak zabývala vlastním experimentem odstraňování konkrétních nástřiků vodními paprsky, vyhodnocením dosažených výsledků a interpretací zjištěných poznatků.

Pulzující vodní paprsek dokáže díky svým pulzacím vyvolat výrazně vyšší destruktivní účinky na obráběný materiál proti kontinuálním vodním paprskům, což bylo nakonec prokázáno v experimentech u všech typů žárových nástřiků. Kontinuální vodní paprsek působí na materiál v podstatě pouze stagnačním tlakem na rozdíl od pulsujícího vodního paprsku, který je schopný vyvolat při dopadu také impaktní tlak a využít tak jevy doprovázející dopad kapaliny na pevný povrch materiálu.

Pulzující vodní paprsek představuje velký pokrok v oblasti obrábění vodním paprskem a to díky svým pulzacím, které dokážou rozrušit materiál mnohanásobně větší silou než běžné kontinuální vodní paprsky. Technologie obrábění vysokorychlostním pulzujícím vodním paprskem také snižuje provozní náklady a šetří zařízení na obrábění, jelikož lze použít menší provozní tlaky a docílit stejných, ne-li lepších výsledků, jako u běžných kontinuálních paprsků. Pulzující vodní paprsek lze považovat za technologii budoucnosti v oblasti obrábění vodním paprskem.



Poděkování:

Rád bych poděkoval paní Ing. et Ing. Mgr. Janě Petrů, Ph.D. za cenné rady při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za odborné vedení a kolektivu Oddělení desintegrace materiálů Ústavu geoniky AVČR za umožnění provedení experimentů do mé práce a za cenné rady a poznatky týkající se vodních paprsků.



Seznam použité literatury:

- [1] SADÍLEK, Marek. Nekonenční metody obrábění I. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107- 8.
- [2] HUMÁR, Anton. Technologie I – Technologie obrábění – 3. část [online]. In: Obor technologie obrábění. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. [cit. 11. ledna 2015]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-3cast.pdf>
- [3] Strojnílyceum.wz. [online]. 2008 - [cit. 19. ledna 2015]. Fyzikální technologie obrábění. [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>>
- [4] Vítejte na zemi [online]. 2006 - [cit. 22. února 2015]. Dostupné z WWW <http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=historie_vyuzivani_energie&site=energie>
- [5] SITEK, L., FOLDYNA, J., ŠVEHLA, B. Vodní paprsek ve strojírenství (1. část). Strojárstvo. 5/2004, ročník VIII, str. 100-101, ISSN 1335-2938.
- [6] SUMMERS, D. A. Waterjetting Technology. London: E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [7] Flow International Corporation [online]. 2009 - [cit. 9. března 2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.flowwaterjet.com>>
- [8] SUMMERS, D., Ph. D. Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Water Jet Technology Association, August 17 -19, 2003, Houston, Texas
- [9] LABUS, T. J. Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.
- [10] LOUIS, H, 14th International Conference on Jetting Technology, BHR Group Conference Series Publication No.32, 21–23 September, 1998, Belgium



- [11] LABUS, Thomas J, Proceedings of the 6th American Waterjet Conference, Water Jet Technology Association, August 24 -27, 1991, Houston, Texas
- [12] MLYNARCZUK, M., SKIBA, M., SITEK, L., HLAVÁČEK, P., KOŽUŠNÍKOVÁ, A. The Research into the Quality of Rock Surfaces Obtained by Abrasive Water Jet Cutting. Archives of Mining Sciences, 2014. Vol. 59 (2014), No 4, p. 925–940, DOI10.2478/amsc-2014-0064.
- [13] HASHISH, Mohamed, Ph. D. Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, Water Jet Technology Association, August 23 -26, 1997 Dearborn, Michigan
- [14] HASHISH, Mohamed, Ph. D. Proceedings of the 10th American Waterjet Conference, Water Jet Technology Association, August 14 -17, 1999 Houston, Texas
- [15] MM Průmyslové spektrum [online]. 2007 - [cit. 19. března 2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>>
- [16] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007 - [cit. 26. března 2015]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-rezani-vodnim-paprskem.html>>
- [17] ABJET [online]. 2007 - [cit. 3. dubna 2015]. Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.abjet.cz/serv01.htm>>
- [18] GEE, Colin, 13th International Conference on Jetting Technolog, BHR Group Conference Series Publication No.21, 29-31 October, 1996, Italy
- [19] GEE, Colin, 15th International Conference on Jetting Technolog, BHR Group Conference Series Publication No.41, 6-8 September, 2000, Sweden



- [20] AWAC [online]. 2009 - [cit. 7. dubna 2015]. AWAC.CZ - řezání vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.awac.cz/cz/2-Rezani-vodnim-paprskem-br-a-vyroba-dilu/1-Rezani-vodnim-paprskem/0/0>>
- [21] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. Glassrevue [online]. 2007- [cit. 9. dubna 2015].č. 4 Dostupný z WWW: < <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>>.
- [22] Safety in jet cutting [online]. 2004 [cit. 10. dubna 2015]. Dostupné z WWW <<http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/safety-in-jet-cutting>>
- [23] FOLDYNA, J. Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků. In: Sitek (ed.), Sborník příspěvků mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009, ÚGN 2009, pp. 48-63, ISBN 978-80-86407-81-4.
- [24] FOLDYNA, J. Pulzující vodní paprsek - technologie budoucnosti? Vesmír 92, prosinec 2013.
- [25] SITEK, L., FOLDYNA, J., ŠVEHLA, B. Vodní paprsek ve strojírenství (2. část). Strojárstvo. 3/2005, ročník IX, str. 53-54, ISSN 1335-2938.
- [26] FOLDYNA, J. SITEK, L. ŠČUČKA, J. MARTINEC, P. VALÍČEK, J. PÁLENÍKOVÁ, K. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface. Journal of material processing technology Vol. 209, Iss. 20 (2009), pp. 6174–6180. Elsevier, 2009. ISSN 0924-0136.
- [27] MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. Vyd Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 150. ISBN 80-248-1217-7
- [28] MOHYLA, Miroslav. Koroze a povrchové úpravy kovů ve strojírenství. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, 1981, 214 s.
- [29] AMBROŽ, Oldřich a KAŠPAR, Jiří. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 318 s. ISBN 80-03-00347-4.



[30] SITEK, L, BODNÁROVÁ, L, SOUČEK, K , STAŠ, L, GURKOVÁ, L, 1 Analysis of inner structure changes of concretes exposed to high temperatures using micro x-ray computed tomography. Vol. 12, No. 1 (177), 79–89, 2015 DOI: 10.13168/AGG.2015.0009